

Návrh a implementace bezdrátového měřicího systému půdní vlhkosti

Design and Implementation of Wireless Soil
Moisture Measuring System

Lukáš Herudek

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a realizací bezdrátového systému umožňujícího měření půdní vlhkosti v několika hloubkách současně v rámci jednoho instalačního místa. Navržený půdní senzor využívá kapacitní princip měření, k přenosu dat je využita bezdrátová síť LoRa.

Půdní sonda se skládá z hlavní řídicí jednotky a různého počtu senzorů, které je možno umístit do různých hloubek dle potřeby. Tělo sondy tvoří polypropylenová trubka o průměru 50 mm, spodní koncovku tvoří plastový hrot. Horní část je možno uzpůsobit dle potřeby, zejména dle velikosti použitého fotovoltaického panelu a antény. Oba díly byly navrženy a přizpůsobeny pro výrobu pomocí 3D tisku.

Naměřená data jsou přes bránu bezdrátové sítě LoRa odesílána protokolem MQTT do centrálního bodu, serveru komunity The Things Network (*MQTT broker*), který data předává do databáze InfluxDB. Následná vizualizace, zobrazující již zpracovaná, lidsky srozumitelná data, je provedena pomocí nástroje Grafana. Propojení datových uzlů zajišťuje program vytvořený pomocí nástroje Node-RED. Pro zpracování, ukládání a vizualizaci dat je využit mikropočítač RaspberryPi verze 3B+.

Nad rámec zadání práce byly vytvořeny i další zařízení (pro kalibraci a testování sítě LoRa, kontrolér závlahového systému), pomocné přípravky (půdní vrták, pomocná plošina) nebo i počítačový program pro usnadnění konfigurace řídicích jednotek sond půdní vlhkosti.

Klíčová slova

Půdní vlhkost, kapacitní senzor, LoRa, The Things Network, MQTT, InfluxDB, Grafana, Node-RED

Abstract

This work deals with the design and implementation of a wireless system for measuring soil moisture in different depths simultaneously within a single installation spot. The designed soil sensor uses a capacitive principle.

The soil moisture probe consists of a control board and a various number of soil sensors, whose measuring depth can be adjusted according to the current needs. The probe body is made from a polypropylene pipe of a 50 mm diameter. Both pipe ends were designed to be manufactured by 3D printers.

The collected data are sent via LoRa wireless network. The LoRa gateway uses MQTT protocol for communication with the central point – the server of The Things Network (MQTT broker) which transfers the data to the InfluxDB database. The visualization of the collected values is done via Grafana. The connection of the data nodes is done by Node-RED. The processing, collection and data visualization is done via RaspberryPi 3B+ single-board computer.

In addition to the original scope, other devices were constructed, such as the calibration and LoRa tester device, irrigation controller and soil auger with a supporting platform. Also, a computer program for easier probe configuration was created.

Key words

Soil moisture, capacitive sensor, LoRa, The Things Network, MQTT, InfluxDB, Grafana, Node-RED

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval mým rodičům a bratrovi za podporu nejen v průběhu tvorby této práce.

Velký dík zasluží sadař, pan Matouš Hodula, jehož zkušenosti a cenné rady přinesly náhled na reálné využití navržené půdní sondy v praxi. Současně si velké poděkování zasluží i agronom z velkého zemědělského podniku na Hlučínsku, který si však přál zůstat v anonymitě, jehož znalosti zemědělského prostředí a postupů poskytly prostor pro další využití půdní sondy v zemědělství.

Současně bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Radovanu Hájovskému, Ph.D. za jeho trpělivost a shovívavost, čímž mimo jiné umožnil bezproblémový průběh práce. Ta se tak i díky němu stala mou srdeční záležitostí, které jsem naplno věnoval téměř dva roky usilovné práce.

V neposlední řadě bych rád vyzdvihnul pomoc přítelkyně Jany Kužílkové, která neúnavně vypomáhala při kalibraci i následné instalaci navržených sond půdní vlhkosti, stejně tak i v případě dalších časově náročných činností, například při měření parametrů navržených interních antén nebo 3D tisku plastových dílů sondy.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	7
Seznam ilustrací.....	9
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Půda – definice a charakteristiky	13
1.1 Voda v půdě.....	13
1.1.1 Měření půdní vlhkosti	14
1.1.2 Řízení půdní vlhkosti.....	14
2 Analýza metod a senzorů pro měření půdní vlhkosti.....	16
2.1 Rozdělení běžně dostupných metod	16
2.1.1 Vodivostní metoda – elektrody v přímém kontaktu s půdou	16
2.1.2 Vodivostní metoda – elektrody umístěny v porézním materiálu.....	17
2.1.3 Měření sacího tlaku půdní vody	19
2.1.4 Kapacitní metoda	20
2.1.5 Neutronová metoda	20
2.1.6 Metoda založená na gama záření.....	21
2.1.7 Metoda zjišťování zpoždění signálu po průchodu zeminou.....	22
2.1.8 Metoda využívající měření fázového posunu signálu po průchodu zeminou ...	22
2.2 Výběr vhodné metody pro zamýšlený měřicí systém	23
2.2.1 Požadavky a předpokládané použití navrhovaného senzoru.....	23
2.2.2 Vybraná metoda	23
3 Návrh a realizace systému pro měření půdní vlhkosti	26
3.1 Mechanická konstrukce těla sondy	26
3.1.1 Horní část těla senzoru.....	26
3.1.2 Spodní část těla senzoru.....	29
3.1.3 Přepážky mezi jednotlivými senzory	30
3.2 Výběr vhodného zapojení senzoru	31
3.2.1 Zkušební verze 0.1.....	31
3.2.2 Zkušební verze 0.2.....	32
3.2.3 Zkušební verze 0.3.....	33
3.2.4 Zkušební verze 0.4.....	33
3.2.5 Zkušební verze 0.5.....	34
3.2.6 Zkušební verze 0.6.....	35
3.2.7 Verze 1.0.....	36
3.2.8 Verze 1.1.....	38
3.2.9 Verze 2.0.....	40
3.2.10 Verze 2.1.....	41
3.2.11 Verze 2.2.....	43
3.2.12 Distanční vložka	45
3.3 Komunikační protokol senzoru.....	46
3.4 Kalibrace senzoru	47

3.4.1	Kalibrace senzorů verze 1.1.....	47
3.4.2	Kalibrace senzorů verze 2.2.....	48
3.4.3	Převodní charakteristika kapacity na půdní vlhkosti.....	48
4	Návrh a realizace bezdrátového přenosu měřených dat s využitím technologie LoRa	50
4.1	Výběr vhodné technologie přenosu dat.....	50
4.1.1	Požadavky na zvolenou technologii	50
4.1.2	Sigfox	51
4.1.3	NB – IoT	51
4.1.4	LoRa	51
4.1.5	Vybraná komunikační technologie	53
4.2	Návrh řídicí jednotky	53
4.2.1	Testovací zařízení pro přenos dat.....	54
4.2.2	Řídicí jednotka verze 1.0	55
4.2.3	Napájecí část verze 1.0.....	57
4.2.4	Napájecí část verze 1.1.....	58
4.2.5	Řídicí jednotka verze 2.0	59
4.2.6	Program pro správu paměti EEPROM řídicí jednotky	60
5	Návrh a realizace vývojového a kalibračního zařízení.....	64
5.1	Popis zapojení.....	64
5.2	Dostupné funkce pro sondy půdní vlhkosti.....	68
5.2.1	Nastavení a vyčítání kalibračních hodnot.....	68
5.2.2	Nastavení konkrétní I ² C adresy senzoru.....	68
5.2.3	Hromadné nastavení I ² C adresy pro více senzorů.....	68
5.2.4	Vyčtení aktuálně naměřených hodnot jednoho senzoru	68
5.2.5	Vyčtení aktuálně naměřených hodnot více senzorů současně	68
5.3	Dostupné funkce LoRa zařízení	68
5.3.1	Výběr předdefinovaného zařízení	69
5.3.2	Odesílání uživatelem definovaných zpráv.....	69
5.3.3	Odesílání zpráv obsahujících data z různých senzorů	69
5.3.4	Nastavení parametrů bezdrátové komunikace	69
5.3.5	Zkouška provozu LoRa zařízení ve třídě C	69
5.3.6	Zobrazení přijatých dat včetně případné reakce.....	69
5.3.7	Zobrazení síly signálu.....	69
5.3.8	Testování interních antén pro řídicí jednotku sondy	70
6	Instalace a servis navržené půdní sondy	74
6.1	Vyrobený zemní vrták.....	74
6.2	Výměna baterie nebo úprava počtu a hloubky senzorů	75
7	Návrh a realizace řídicí jednotky závlahového systému s využitím bezdrátové technologie LoRa..	77
7.1	Požadavky na řídicí člen závlahového systému	77
7.2	Návrh systému.....	77
7.2.1	Rozložení konektorů.....	78
7.2.2	Záložní napájení.....	80
7.3	Příklad topologie a funkce závlahového systému	81

8	Přenos, ukládání a vizualizace naměřených dat.....	83
8.1	LoRa brána.....	84
8.2	Databáze.....	85
8.3	Vizualizace dat.....	85
8.4	Vzájemné provázání použitých modulů řetězce zpracování dat.....	85
8.5	Navržená topologie systému	86
8.6	Aplikace pro OS Android.....	87
9	Testování navržených sond a využití naměřených dat	89
9.1	Zkušební provoz samostatné sondy umístěné v půdě	89
9.2	První etapa testování navržené sondy v terénu	91
9.2.1	Sestavení a instalace sondy v rámci první testovací etapy	91
9.2.2	Naměřená data v rámci první testovací etapy	93
9.3	Druhá etapa testování navržené sondy v terénu	95
9.3.1	Sestavení a instalace sond v rámci druhé testovací etapy	95
9.3.2	Naměřená data v rámci druhé testovací etapy	98
9.4	Možné využití půdní sondy a naměřených dat.....	101
9.4.1	Obaleč jablečný	102
9.4.2	Hořká pihovitost jablek	102
9.4.3	Netradiční způsob pěstování zeleniny ve skleníku	102
9.4.4	Zemědělské využití sond půdní vlhkosti	103
9.5	Další využití navrženého senzoru	104
9.5.1	Použití senzoru a naměřených dat mimo původní účel	104
9.6	Další směry vývoje navrženého systému.....	105
	Závěr.....	107
	Literatura	108
	Seznam příloh.....	112

Seznam zkratk a symbolů

3D	Trojdimenzionální
A/D	Analogově/digitální
BV	Bod vadnutí
CDC.....	Capacitance to Digital Converter – převodník kapacity na digitální hodnotu
CMOS	Complementary Metal–Oxide Semiconductor – technologie výroby integrovaných obvodů
ČHMÚ.....	Český hydrometeorologický ústav
ČRa	České Radiokomunikace
DC.....	Direct Current – stejnosměrný proud
DIN	Deutsche Industrie-Norm – německá národní norma
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory – elektricky mazatelná nevolatilní paměť
GMS.....	Granular Matrix Sensor – senzor půdní vlhkosti využívající porézní materiál obalený mřížkou
HTTP.....	Hypertext Transfer Protocol – síťový protokol
I2C	Inter-Integrated Circuit – sériová sběrnice
ISM	Industrial, scientific and medical band – vyhrazené pásmo průmyslové, vědecké a zdravotnické obory
ISP	In-system programming – rozhraní pro programování mikrokontroléru
JSON	JavaScript Object Notation – datový formát nezávislý na použité platformě
LDPE	Low Density Polyethylene – Polyethylen s nízkou hustotou
LED	Light-Emitting Diode – světlo emitující dioda
LPWAN	Low Power Wide Area Network – nízkoenergetická rozlehlá síť
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport – síťový protokol
NAND	Funkce negovaného logického součinu
NC.....	Normally Closed – rozpínací kontakt
NO	Normally Open – spínací kontakt
OLED.....	Organic Light-Emitting Diode – organická světlo emitující dioda
OS.....	Operační systém
PETG	PolyEthylenTereftalátGlykol
PVK.....	Polní vodní kapacita
RC	Resistor-Capacitor – Rezistor-Kondenzátor
RSSI.....	Received Signal Strength Indicator – indikátor síly přijímaného signálu
SF.....	spreading factor – faktor šíření (odpovídá typu modulace)
SMD.....	Surface Mount Device – součástka umístěná pouze na povrchu
SMT	Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže součástek
SNR.....	Signal-to-noise ratio – poměr signálu k šumu
SQL	Structured Query Language – standardizovaný strukturovaný dotazovací jazyk
TDR.....	Time Domain Reflectometry – metoda pulsní reflektometrie
THT	Through-Hole Technology – technologie osazování součástek skrz desku
TTN	The Things Network

TWI..... Two Wire Interface – multi-masterová sériová sběrnice (obdoba I2C)
UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter – asynchronní komunikace
VVK..... Využitelná vodní kapacita

Seznam ilustrací

Obrázek 1 – Koroze elektrod senzoru měřícího vodivost půdy [8]	17
Obrázek 2 – Sádrový bloček určený k měření půdní vlhkosti [9]	18
Obrázek 3 – Senzor půdní vlhkosti označovaný jako GMS [10]	18
Obrázek 4 – Mechanický tensiometr [11]	19
Obrázek 5 – Nadzemní část neutronové sondy půdní vlhkosti [12].....	21
Obrázek 6 – Senzor využívající TDR metodu [13]	22
Obrázek 7 – Dvojice senzorů VIRRIB před zkušební instalací	22
Obrázek 8 – Nevhodně konstruovaný senzor, vlhkost pronikla hranou desky plošných spojů [14].....	24
Obrázek 9 – EnviroSCAN – profilová vlhkostní sonda sestávající z jednotlivých segmentů [15]	25
Obrázek 10 – Řez jednoduché vrchní krytky trubky, zdroj: autor	27
Obrázek 11 – Řez multifunkční vrchní krytky trubky, zdroj: autor	28
Obrázek 12 – Krabice pro umístění DPS se senzory, zdroj: autor.....	29
Obrázek 13 – Detail tří nejčastějších horních zakončení těl senzorů po nátěru, zdroj: autor	29
Obrázek 14 – Spodní zakončení trubky, zdroj: autor	30
Obrázek 15 – Přepážka mezi jednotlivými senzory, zdroj: autor	30
Obrázek 16 – Zkušební zapojení senzoru verze 0.1	31
Obrázek 17 – Testování principu funkce kapacitního senzoru vlhkosti půdy	32
Obrázek 18 – Senzor verze 0.3	33
Obrázek 19 – Schéma generátoru pro senzor verze 0.5	34
Obrázek 20 – Senzor verze 0.6	35
Obrázek 21 – Část schématu senzoru v1.0 – galvanické oddělení měřícího obvodu	36
Obrázek 22 – Senzor verze 1.0	38
Obrázek 23 – Senzor verze 1.1	39
Obrázek 24 – Zkušební zapojení převodníku AD7150 v nepájivém poli	40
Obrázek 25 – Zkušební zapojení převodníku AD7745 v nepájivém poli	41
Obrázek 26 – Nový koncept pružných elektrod senzoru verze 2.1	42
Obrázek 27 – Schéma zapojení měřící části senzoru verze 2.2	43
Obrázek 28 – Zjednodušený algoritmus programu senzoru verze 2.2.....	44
Obrázek 29 – Senzor verze 2.2	45
Obrázek 30 – Distanční vložka délky 50 cm	45
Obrázek 31 – Detail zadní strany distanční vložky, zdroj: autor	46
Obrázek 32 – Znázornění průběhu komunikace sběrnice I2C, příkaz SET_CAPDAC_VALUE	46
Obrázek 33 – Znázornění průběhu komunikace sběrnice I2C, příkaz GET_TEMP.....	47
Obrázek 34 – Naměřená převodní kalibrační křivka pro senzory verze 2.2.....	49
Obrázek 35 – Světový rekord v maximální dosažené vzdálenosti komunikace LoRa zařízení [29].....	53
Obrázek 36 – Testovací zařízení pro ověření komunikace sítě LoRa.....	54
Obrázek 37 – Řídicí jednotka s připojenou napájecí částí, obě ve verzi 1.0.....	55
Obrázek 38 – Zjednodušený algoritmus programu řídicí jednotky	56
Obrázek 39 – Schéma nabíjecí části ve verzi 1.1	58
Obrázek 40 – Napájecí část ve verzi 1.1	59
Obrázek 41 – Řídicí jednotka verze 2.0	60

Obrázek 42 – Konfigurační program pro správu EEPROM, základní konfigurace	61
Obrázek 43 – Konfigurační program pro správu EEPROM, vizualizace rozložení paměti	62
Obrázek 44 – Průběh práce programátoru je uživateli textově zobrazen	63
Obrázek 45 – Detail obrazovky kalibračního zařízení.....	65
Obrázek 46 – Deska plošných spojů s rastrem 5 × 5 LED	65
Obrázek 47 – Pomocné vývojové a kalibrační zařízení – „Kalibrátor“ ve spojení s LoRa zařízením.....	66
Obrázek 48 – Vývojové a kalibrační zařízení v krabici	67
Obrázek 49 – První testovaná interní anténa [35]	70
Obrázek 50 – Druhá testovaná interní anténa [36].....	70
Obrázek 51 – Základ třetí testované interní antény [37]	71
Obrázek 52 – Základ čtvrté testované interní antény [38].....	71
Obrázek 53 – Pátá testovaná interní anténa [39]	71
Obrázek 54 – Šestá testovaná interní anténa [40].....	72
Obrázek 55 – Externí anténa testovaná pro porovnání s interními verzemi	72
Obrázek 56 – Zkušební přípravky pro testování interních antén	73
Obrázek 57 – Detail bajonetového spoje vrtáku a rukojeti před nátěrem	74
Obrázek 58 – Vyrobený půdní vrták s pomocnou plošinou, zdroj: autor	75
Obrázek 59 – Výsledná podoba řídicí jednotky závlahového systému	79
Obrázek 60 – Příklad topologie závlahového systému.....	81
Obrázek 61 – Popis datového paketu LoRa komunikace, odesílaného z půdní sondy	83
Obrázek 62 – Brána umožňující připojení senzorů do sítě LoRa	84
Obrázek 63 – Ukázka části vizualizace naměřených dat pomocí nástroje Grafana	85
Obrázek 64 – Ukázka programu nástroje Node-RED	86
Obrázek 65 – Navržená topologie měřicího a řídicího systému.....	87
Obrázek 66 – Počáteční obrazovka a obrazovka s grafem aplikace pro OS Android	88
Obrázek 67 – Zkušební provoz sondy umístěné v přípravku se zeminou	90
Obrázek 68 – Naměřené hodnoty půdní vlhkosti při prvním zkušebním provozu	91
Obrázek 69 – Sonda před sestavením pro měření v rámci první testovací etapy.....	92
Obrázek 70 – Sonda instalovaná v rámci první testovací etapy.....	92
Obrázek 71 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 08.06.2020 do 13.06.2020	93
Obrázek 72 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 22.06.2020 do 26.06.2020	94
Obrázek 73 – Sonda před sestavením, určené pro měření v rámci druhé testovací etapy	96
Obrázek 74 – Vrtání otvoru pro třetí sondu za pomoci vyrobeného vrtáku a pomocné plošiny.....	97
Obrázek 75 – Instalované sondy v rámci druhé testovací etapy.....	97
Obrázek 76 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 06.04.2021 do 20.04.2021, sonda 1.....	99
Obrázek 77 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 12.04.2021 do 20.04.2021, sonda 2.....	100
Obrázek 78 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 14.04.2021 do 20.04.2021, sonda 3.....	101
Obrázek 79 – Aktuální agronomická rizika dle webu AgroRisk [45].....	104

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Určení vlhkosti půdy dle hmatové zkoušky [3]	14
Tabulka 2 – Porovnání naměřených hodnot testovaných antén	72
Tabulka 3 – Sestava sond určených pro druhou etapu testování	95

Úvod

Základním podnětem k vytvoření této práce byla snaha zjednodušit, zlevnit a automatizovat monitorování půdní vlhkosti, zejména na polích a v sadech, případně i vinicích. Byť v dnešní době existuje celá řada půdních senzorů, mnoho z nich vyžaduje složitou instalaci ve formě výkopu. Rovněž je většina senzorů vybavena pouze drátovým rozhraním, spojujícím senzory s řídicí centrální jednotkou. Takovéto řešení je ale pro většinu použití nevhodné. Celková pořizovací cena systému je následně výrazně navýšena právě potřebnými výkopovými pracemi, nejen v případě půdních senzorů samotných, ale i podpovrchovým uložením propojovací kabeláže.

Potřebná půdní sonda tedy musí splňovat dvě základní kritéria – snadnou instalaci a bezdrátový sběr dat. Nejvýhodnějším typem instalace je vyvrtání otvoru, do kterého je následně sonda trubkového tvaru vložena. Tímto odpadá potřeba pracného zpětného zasypávání a udusávání výkopu, kdy je potřeba důrazně dbát na dodržení původní půdní skladby. Vrtaný otvor navíc měřenou lokalitu naruší pouze minimálně a půdní senzory je tak možné instalovat blíže požadovanému místu, například blíže kmenu stromu, tedy přímo do kořenového systému, kde je potřeba půdní vlhkost měřit.

Bezdrátový systém odstraňuje potřebu instalace kabeláže. Díky tomu je možné samostatné půdní sondy instalovat na větší ploše, navíc bez navýšení nákladů. Propojující kabeláž současně může překážet technice, například při orbě. Kabely jsou rovněž náchylné na mechanické poškození, zejména při pohybu okolní půdy, typicky při promrznutí země nebo při přejezdu těžké techniky.

Jelikož mohou být samotné senzory půdní vlhkosti založeny na různém principu měření, je potřeba dostupné metody nejprve analyzovat a posléze zvolit takovou, která bude nejvíce vyhovovat předpokládané konstrukci a použití. Samozřejmým požadavkem je schopnost opakovaného měření v rámci jedné lokality, zároveň je výhodné jednotlivé senzory umístit v rámci trubky umístěné ve vrtu nad sebe, čímž je možné změřit půdní vlhkost v různých hloubkách při použití jediné sondy.

Obdobná je situace v případě dostupných bezdrátových technologií. Dle předpokladu budou jednotlivé sondy půdní vlhkosti přenášet pouze velmi malé množství dat, odhadem řádově desítky bajtů. Interval měření, a tedy i odesílání dat, se navíc předpokládá v řádu desítek minut. Samotné sondy navíc budou vybaveny pouze vlastním zdrojem energie, pro zajištění dlouhé životnosti je proto potřeba zvolit takové řešení, které vyniká nízkou spotřebou. Dalším zásadním kritériem je dosah zvolené bezdrátové komunikační technologie, neboť je potřeba umožnit rozmístění půdních sond na velké ploše s předpokládanou vzdáleností jednotlivých zařízení sítě i v řádu stovek metrů.

Vytvořený systém by měl umožnit bezobslužné měření půdní vlhkosti s minimálními nároky na instalaci a provoz při zachování nízké pořizovací ceny celého systému.

1 Půda – definice a charakteristiky

Obecně bývá za půdu označována svrchní vrstva zemské kůry. Hloubka půdy je definována mocností půdního profilu, který se dělí na jednotlivé půdní horizonty. Tloušťka půdní vrstvy se různí dle lokace, v České republice zpravidla nepřesahuje 150 cm. [3]

Z pohledu elektrotechniky je nejzajímavější vlastností půdy takzvané půdní podnebí, které je charakterizováno zejména teplotou a vlhkostí. Povrch půdy je velmi výrazně ovlivněn meteorologickými procesy přilehlé atmosféry, přičemž s rostoucí hloubkou se tento vliv snižuje a zejména zpomaluje. V hloubce více jak jednoho metru již zpravidla nelze rozpoznat denní fluktuaci teplot, půda hlouběji než 30 metrů již nebývá ovlivněna ani ročními obdobími. Půdní vlhkost je oproti teplotě podstatně výrazněji závislá na typu půdy, obě veličiny jsou však společně provázány. [3]

Rozdělení a správné klasifikování daného půdního vzorku je značně složitým úkolem. Klasifikace se odvíjí zejména od barvy, zrnitosti, struktury, obsahu organické hmoty a dalších fyzikálních (pórovitost, obsah vody, ...) a chemických (pH, sorpce, obsah iontů a živin, ...) vlastností. [3]

Základem správné klasifikace půdního horizontu je správný odběr vzorku půdy, přičemž nezáleží pouze na způsobu odběru, ale také na volbě vhodného odběrného bodu. Mocnost i složení půdy značně závisí na terénních prvcích konkrétní lokace (svahy, údolí, stavby, porost, ...), proto je zapotřebí nejprve takovéto prvky identifikovat a vyhodnotit a na základě kvalifikovaného úsudku vhodně lokalizovat odběrná místa. Pravidelné šachovnicové rozmístění odběrných bodů je tak zpravidla předzvěstí nízké kvality získaných informací. Samotný odběr vzorků je možné provést mnoha způsoby, nejčastěji se používají sondy vpichové, vrtané a kopané. Pro sondáž na délce přesahující 80 centimetrů je výhodné použít průzkumné rýhy, které se často provádějí strojově. [3]

Odebrané vzorky se dle míry uchování původních vlastností rozdělují na porušené, neporušené, polo-porušené a monolity. Při následném skladování je rovněž potřeba dodržet maximální dobu skladování, která je závislá zejména na použitém skladovacím obalu (například igelitový sáček či nerezová schránka). Dále platí, že s klesající skladovací teplotou se maximální doba skladování prodlužuje. [3]

1.1 Voda v půdě

Voda se může v půdě vyskytovat bez ohledu na skupenství, souhrnně se označuje pojmem půdní voda – nejvýznamněji se však projevuje skupenství kapalné. To se do půdy dostává nejčastěji shora, za pomoci atmosférických srážek nebo vsakováním z vodních toků a nádrží. Další možností zvýšení obsahu kapalné vody v půdě je vztlínání z hladiny spodní vody.

V souvislosti s půdní vodou jsou nejčastěji používány tyto pojmy: [3]

- PVK (% obj.) ~ polní vodní kapacita; označuje množství vody, které je půda schopna zadržet po delší dobu. Někdy se také označuje jako RVK ~ retenční vodní kapacita.
- BV (% obj.) ~ bod vadnutí; obsah vody, která je v půdě vázána příliš velkou silou a je tak pro kořeny rostlin nedostupná.
- VVK (% obj.) ~ využitelná vodní kapacita; určuje největší možné množství vody, které je plodina schopna odčerpat z půdy nasycené na polní vodní kapacitu. VVK je vypočtena rozdílem nejvyšší (BV) od nejvyšší (PVK) hodnoty dostupné vody.

1.1.1 Měření půdní vlhkosti

Půdní vlhkost udává aktuální obsah vody v půdě. Obvykle je udávána v procentech vztažených k objemu nebo hmotnosti vysušené půdy. Vysušení půdy se v laboratorních podmínkách provádí při 105 °C do konstantní hmotnosti. Rozdílem hmotnosti vysušené půdy od hmotnosti odebraného vzorku získáme přímo množství vody obsažené v půdě. Jedná se tedy o metodu přímou, která se označuje jako tzv. gravimetrická metoda. Alternativou jsou nepřímé metody, které využívají fyzikálních vlastností půdy jako například elektrická kapacita, elektrický odpor nebo míra pohlcování neutronového či gama záření. [7]

Objemová půdní vlhkost: [7]

$$\theta = \frac{V_{VODA}}{V_{VZOREK}} \cdot 100 \quad (1)$$

kde:

- θ – objemová půdní vlhkost (%),
- V_{VODA} – objem vody obsažené v půdě (m³),
- V_{VZOREK} – objem vysušeného vzorku půdy (m³).

Hmotnostní půdní vlhkost: [7]

$$w = \frac{m_{VODA}}{m_{VZOREK}} \cdot 100 \quad (2)$$

kde:

- w – hmotnostní půdní vlhkost (%),
- m_{VODA} – hmotnost vody obsažené v půdě (kg),
- m_{PUDA} – hmotnost vysušeného vzorku půdy (kg).

V polních podmínkách se k orientačnímu určení půdní vlhkosti často využívá hmatová zkouška. Výsledkem je poté slovní označení dle následující tabulky.

Tabulka 1 – Určení vlhkosti půdy dle hmatové zkoušky [3]

Znaky	Slovní určení vlhkosti půdy
Beze známek vlhkosti	Vyprahlá
Nevyvolává pocit chladu	Suchá
Vyvolává pocit chladu, ruku neovlhčuje	Vlahá
Ruku ovlhčuje	Vlhká
Voda odkapává	Mokrá

1.1.2 Řízení půdní vlhkosti

Zlepšení úrodnosti půdy se obecně označuje jako meliorace. Jako meliorační opatření jsou obvykle myšleny systémy odvodnění pozemku či naopak závlahové systémy, řadí se zde však například i vápnění kyselých půd nebo vylehčování těžkých půd. Stejně tak je za meliorační úpravu považována protierozní ochrana zeminy nebo i lesnické meliorace prováděné vysazováním melioračních dřevin. [3]

Pro účely řízení vlhkosti půdy je v zásadě možno využít dva způsoby: odvodnění nebo závlahu. Řízení závlahy lze provést poměrně jednoduše za pomoci čerpadel, ventilů a hadic vedoucí vodu na danou oblast. Samotné koncové doručení vody do půdy, respektive ke kořenům rostlin je možno

realizovat různě. Běžně se využívají rozprašovače. Při kladení důrazu na spotřebu vody a celkovou efektivitu hospodaření je zpravidla výhodnější použít kapkovou závlahu. V případě závlahových systémů je tak možné poměrně jednoduše využít elektronický řídicí systém pro automatické řízení závlahy, neboť se v zásadě pouze jedná o ovládání chodu čerpadel a příslušných ventilů.

Správnou instalací a vhodným využíváním závlahového systému je možné podstatně zvýšit nejen objem zemědělské produkce, ale rovněž i její kvalitu. Případně je možné na dané lokalitě pěstovat plodiny, které by jinak uhynuly v důsledku vláhového nedostatku. Závlahový systém, zejména ten nesystematicky využívaný, však může vést k vymývání důležitých živin z půdy a z dlouhodobého pohledu může zásadně zhoršit její produkční schopnost. Kompenzací může být četnější použití hnojiv. To s sebou ale nese riziko zasolení půdy, případně i možnost kontaminace půdy těžkými kovy. Nevhodným používáním závlahových systémů se rovněž zvyšuje riziko eroze půdy a znečištění podzemních vod herbicidy a pesticidy.

Odvodnění zemědělských ploch je zpravidla řešeno instalací drenážního systému, který sníží hladinu podzemní vody pod úroveň potřebnou pro správný vývoj a funkci kořenového systému dané plodiny. Zejména v minulosti však byly odvodňovány i lokality nevhodné pro zemědělskou produkci, například oblasti s nepříznivými fyzikálními vlastnostmi půdních horizontů nebo oblasti s výskytem mokřadů, pramenišť a vývěrů. Odvodnění je vždy poměrně značným zásahem do životního prostředí, je tedy potřeba důkladně zvážit, zda je takovýto zásah pro danou lokalitu vhodný a únosný. Rovněž je potřeba vzít v potaz životnost takovýchto systémů, neboť drenážní kanály mohou být zaneseny a ucpány, případně i přerušeny v důsledku pohybu zeminy. [3]

Automatizované řízení odvodnění rozsáhlých ploch již představuje určitou výzvu, nejedná se však o neřešitelný problém. K instalaci drenážního systému je zpravidla potřeba velkého zásahu na daném pozemku (výkopové práce), což vede i k finanční náročnosti. Za pomoci řízeného odvodňování je však možné zásadně zvýšit výnosnost dané lokality. Je ale potřeba jej provést správně, zpravidla následujícím způsobem: Několik týdnů před zasetím plodin je odvodňovací ventil dané oblasti naplněn otevřen a dochází tak k úplnému odvodnění oblasti až do úrovně odvodňovací šachty za účelem umožnění vjezdu těžké zemědělské techniky na pozemek. Po zasetí je odvodňovací ventil uzavřen pouze z části, čímž dojde ke zvýšení úrovně spodní vody, ale pouze do té výše, která je pro danou plodinu vhodná. Výšku hladiny spodní vody je zároveň možno v průběhu růstu rostlin upravovat. Před sklizní dojde opět k otevření odvodňovacího ventilu, obdobně jako před zasetím. Po sklizni je ventil zcela uzavřen a pozemek se tedy nachází ve stavu před instalací odvodňovacího systému. Vyšší hladina spodní vody zaručuje zadržení dostatečného množství vody na pozemku, zároveň je omezeno vymývání živin a větrná eroze půdy. [6]

2 Analýza metod a senzorů pro měření půdní vlhkosti

Aby bylo možné správně navrhnout potřebný měřicí systém, je potřeba nejprve důkladně analyzovat různá dostupná či již používaná řešení. Zároveň se předpokládá, že navržený a realizovaný senzor bude vždy kompromisem mezi různými vlastnostmi, neboť některé z požadovaných vlastností jsou protichůdné nebo je nelze vzhledem k předpokládanému použití výsledného měřicího systému realizovat.

2.1 Rozdělení běžně dostupných metod

Měřicí metody je možno rozdělit dle různých kritérií, například dle místa měření, dle míry zásahu v místě měření nebo dle fyzikálních principů či možnosti opakování měření. Jelikož je cílem navrhnout systém pro měření půdní vlhkosti zejména na polích a v sadech, není potřeba se zabývat měřením laboratorním. Stejně tak je potřeba brát ohled na co nejmenší zásah do půdního horizontu při instalaci senzoru. Samozřejmostí je mnohonásobné opakování měření v daném místě bez nutnosti odebrání půdního vzorku a bez potřeby zásahu obsluhy. Jelikož v polních podmínkách není fyzikálně možné změřit množství vody obsažené v půdě přímo (došlo by k odstranění vody z půdy v okolí senzoru, což je nežádoucí), je potřeba hledat nepřímé měřicí metody.

Řada metod měřících vlhkost půdy je závislá nejen na jejím typu, ale také na teplotě nebo například na míře zasolení či kontaminaci těžkými prvky. I přes veškerou snahu je zpravidla nemožné tyto vlivy dokonale odstranit a často jsou tak pouze dodatečně kompenzovány aproximací jejich vlivu na měřenou veličinu. U některých metod je možné některé vlivy zcela zanedbat, je však potřeba takový krok důkladně zvážit a případně zdůvodnit.

Dalším důležitým parametrem je časový interval mezi instalací snímače do půdy a jeho schopností podat relevantní výsledek. Některé metody vyžadují zakopání snímače do potřebné hloubky, což vede k porušení půdního profilu. Takto narušená lokalita zpravidla potřebuje čas v řádech týdnů či dokonce měsíců (například na obnovení kořenového systému rostlin), než je schopna podat relevantní výsledky měření. Ideálním případem je schopnost měřicího systému provést přesné měření bezprostředně po instalaci snímače v dané lokalitě.

2.1.1 Vodivostní metoda – elektrody v přímém kontaktu s půdou

Prakticky nejjednodušší metodou měření půdní vlhkosti je využití změny elektrického odporu půdy v závislosti na množství obsažené vody. V zásadě je potřeba pouze zapíchnout měřicí elektrody do půdy a napojit je k samotnému měřicímu systému. Základní omezující vlastností je pouze malý objem měřené půdy. Měřená oblast se nachází pouze mezi elektrodami a v jejich těsné blízkosti. Zvětšení měřeného objemu je možné zajistit prodloužením tyčových elektrod, od určité délky je ale potřeba elektrody umísťovat horizontálně, což ale odstraňuje jednu z hlavních výhod této metody – snadnou instalaci zapíchnutím elektrod shora.

Mezi hlavní nevýhody patří koroze elektrod senzoru. Existují sice způsoby, jak korozi zpomalit (použití pozlacených nebo uhlíkových elektrod, střídání polarity detekčního napětí, ...), nicméně díky vlastnostem zeminy i přes tato opatření dochází k elektrolyze a elektrody tak jsou postupně buď rozpouštěny do půdy, nebo se naopak obalí vodivými elementy půdy. Zejména rozpouštění elektrod je velkým problémem, neboť může způsobit zemědělskou degradaci až znehodnocení zeminy v okolí senzoru důsledkem zanesení těžkých kovů či jiných nepůvodních látek do půdy a potenciálně i do podzemních vod.



Obrázek 1 – Koroze elektrod senzoru měřícího vodivost půdy [8]

Další nevýhodou je silná závislost na dokonalém kontaktu elektrod s půdou. V případě vyschnutí či popraskání půdy tak může velmi snadno dojít ke zmenšení stykové plochy elektrod s půdou, které se projeví náhlým zvýšením rezistivity. Měřicí systém sice tento jev může v některých případech správně vyhodnotit, nicméně není zaručeno, že se po pominutí sucha obnoví původní dokonalý kontakt elektrod s přilehlou půdou. Je tak potřeba senzor opětovně kalibrovat nebo reinstalovat.

Do měření samozřejmě vstupuje i závislost rezistivity na teplotě. Tento vliv je ale možné dodatečným zpracováním dat poměrně dobře kompenzovat – je však zapotřebí znát teplotu měřeného objemu půdy. Tím však roste nejen složitost potřebné elektroniky, ale rovněž i samotné instalace senzoru v dané lokalitě.

2.1.2 Vodivostní metoda – elektrody umístěny v porézním materiálu

Princip měření je totožný jako u metody s přímým kontaktem elektrod s půdou. Umístěním elektrod do porézního materiálu jsou omezeny obě hlavní nevýhody předchozí metody – koroze elektrod a problém s dokonalým kontaktem s půdou. Jelikož je měřena vodivost navlhčeho homogenního materiálu mezi elektrodami, nevystává zde problém s citlivostí na zasolení půdy, které je zároveň jedna z hlavních příčin koroze elektrod.

Elektrody se nejčastěji umísťují do sádry, čímž vznikne takzvaný „sádrový bloček“. Elektrody přitom mohou mít různý tvar, kromě klasických tyčových elektrod se používají i různě tvarované mřížky či spirály. Sádrové senzory se vyznačují nízkou cenou, nevýhodou je zde ale poměrně nízká přesnost a velká hystereze. Jsou tak zpravidla využívány pouze u systémů řízení závlah, kde je sledována binární hodnota vlhkosti půdy: sucho – vlhko. Vzhledem k použitému materiálu časem dochází k mechanickému rozpadu těla snímače, čímž dojde k zásadnímu zhoršení vlastností a později k úplné destrukci snímače.



Obrázek 2 – Sádrový bloček určený k měření půdní vlhkosti [9]

Hystereze vlhkosti porézního materiálu s sebou přináší nevýhodu ve formě opožděné reakce snímače na aktuální stav. U písčitých půd může dokonce dojít ke stavu, kdy je půda maximálně nasycena vodou (například přívalový déšť), ale následně je tato voda rychle vsáknuta do hlubších vrstev, přičemž senzor tento jev nemusí vůbec zaregistrovat.

Obalením sádrového bločku nebo křemenného porézního materiálu syntetickou propustnou membránou je možné zvýšit mechanickou životnost senzoru, zároveň je možné použít menší objem materiálu, čímž je zmenšena hystereze snímače. Takovéto senzory se označují jako GMS („*Granular Matrix Sensor*“). I přes značný pokrok v použitých materiálech však tento senzor vykazuje nižší přesnost v porovnání s jinými metodami, a i díky své hysterezi je pro mnoho aplikací nevhodný.

Umístěním teplotního čidla přímo do těla senzoru je možné vytvořit kompaktní senzor pro snímání vlhkosti půdy a její teploty současně.



Obrázek 3 – Senzor půdní vlhkosti označovaný jako GMS [10]

Díky odolnosti senzoru vůči zasolení zeminy není pro řadu půd potřeba kalibrace, při instalaci senzoru tak není potřeba přesně analyzovat složení dané půdy. Před samotnou instalací senzorů je ale zpravidla nutná jejich rehydratace, obvykle prováděná ponořením těla senzoru do vody po dobu minimálně 24 hodin.

2.1.3 Měření sacího tlaku půdní vody

Půdní vlhkost je možno měřit speciálními tlakoměry, neboť právě množství vody v půdě využitelné rostlinami je charakterizováno takzvaným sacím tlakem. Jedná se o sílu, kterou musí rostliny překonat, aby mohly vodu z půdy čerpat. Byť se z principu jedná o měření tlaku, nevyužívá se klasických tenzometrů, ale takzvaných tenziometrů. Jedná se o zařízení trubicovitého tvaru naplněného vodou, přičemž spodní část je opatřena keramickou membránou. V horní části se poté nachází snímač tlaku, respektive podtlaku, jehož výstup může být buďto mechanický (ručičkový ukazatel) nebo elektronický (analogový nebo digitální výstup). Tenziometry nachází využití zejména v polních podmínkách.

Tato metoda přináší řadu výhod. Zaujme hlavně relativně nízkou cenou, měření navíc není ovlivněno salinitou půdy. Při použití mechanických tlakoměrů navíc není potřeba elektrické napájení a naměřenou hodnotu je možno odečíst přímo v místě měření.



Obrázek 4 – Mechanický tenziometr [11]

Zásadní nevýhodou této metody je potřeba doplňování odvzdušněné (deaerované) vody, zejména v letním období. Řada tenziometrů sice umožňuje doplňování vody bez nutnosti vyjmutí snímače z půdy, i přesto potřeba doplňování vody prakticky limituje dobu funkčnosti senzoru bez zásahu obsluhy. Tato metoda je tak vhodná pouze pro krátkodobé měření, samotný snímač je potřeba vyjmout z půdy před poklesem teploty k bodu mrazu, neboť by při zamrznutí vody uvnitř těla tenziometru mohlo dojít k jeho poškození. Snímač navíc vyžaduje dokonalý kontakt s půdou, měření má rovněž poměrně dlouhou dobu odezvy a není tak možné dokonale sledovat rychlé děje, zejména v písčitéch půdách charakteristických rychlou změnou obsahu vody.

2.1.4 Kapacitní metoda

Množství vody obsažené v půdě má značný vliv na permitivitu půdy. Zatímco u destilované vody je při 20 °C uváděna hodnota relativní permitivity ϵ_{rVODA} okolo 81, u vyprahlé půdy je hodnota řádově nižší – samozřejmě záleží na složení konkrétní půdy. Přítomnost vody v půdě má tedy na relativní permitivitu zásadní vliv a toho lze velmi dobře využít právě pro určení množství přítomné vody, a tedy vlhkosti dané půdy. Dále je zřejmé, že senzor využívající kapacitní metodu vyžaduje kalibraci pro danou půdu měřené lokality. Například vlhká písčitá půda může vykazovat hodnotu permitivity rovnu dvaceti, zatímco jílovitá půda může vykazat při stejném množství přítomné vody hodnotu permitivity rovnu patnácti. [1][7]

Výsledná kapacita kondenzátoru samozřejmě záleží na jeho fyzických rozměrech, předpokladem je konstantní velikost i vzdálenost elektrod. U konstrukce kompaktního senzoru pro měření půdní vlhkosti, kdy je půda mezi elektrodami použita jako dielektrikum, lze očekávat kapacitu v řádu jednotek až desítek pF. Maximální změnu kapacity (mokrý – vyprahlý půda) pak lze očekávat v řádu jednotek pF. Měření takto nízké kapacity s sebou přináší řadu problémů a je poměrně obtížné dosáhnout přesnosti v řádu desetin procenta objemové vlhkosti půdy. [2]

Existuje více způsobů, jak permitivitu dané půdy změřit. Kondenzátor, kde dielektrikum tvoří právě půda, je možné v různých obvodech zapojit různě a docílit tak jiné funkce kondenzátoru v obvodu.

Jednou možností je použití takového kondenzátoru pro ladění frekvence RC oscilátoru. Měření frekvence v řádech desítek či stovek kHz lze jednoduše provést pomocí čítání pulzů za pevně danou periodu času. Výhodou této metody je možnost dosáhnout vysokého rozlišení, po přepočtu na hodnotu kapacity je tak možno sledovat i změny v řádu jednotek fF. Zásadní nevýhodou je značná teplotní závislost RC oscilátoru, kterou je potřeba kompenzovat. Kompenzaci je sice možné provést přímo v analogové části obvodu, ale vzhledem k předpokladu připojení takového senzoru k mikrokontroléru je vhodnější provést digitální kompenzaci, neboť u té není potřeba manuálně zasahovat do analogového obvodu například nastavováním odporového trimru.

Jiná metoda může využívat půdou ovlivněný kondenzátor jako součást integračního článku, jehož úkolem je převést pulzní signál na analogovou hodnotu napětí. V tomto případě je rozlišení metody dáno rozlišením A/D převodníku. Kromě šumu převodníku zde stabilitu ovlivňuje nedokonalost integračního článku a z toho vyplývající kolísání naměřených hodnot. V porovnání s metodou využívající ladění RC oscilátoru je tato metoda méně ovlivněna teplotou, přesto je teplotní kompenzace potřeba.

Rovněž je možno využít integrovaných převodníků kapacity na digitální hodnotu (CDC). Příkladem může být integrovaný obvod AD7745, který díky integrovanému 24bitovému $\Sigma\Delta$ převodníku dosahuje teoretického rozlišení až 4 aF. V praxi je naměřená hodnota samozřejmě zatížena šumem a přesnost měření je podstatně horší. Velkou výhodou těchto integrovaných převodníků je obvyklá přítomnost teplotního snímače přímo v samotném čipu, přičemž převodník zpravidla provádí teplotní kompenzaci interně a není tak potřeba ji implementovat do dalších částí měřicího řetězce.

2.1.5 Neutronová metoda

Tato metoda se spoléhá na zpomalení rychlých neutronů nejčastěji vznikajících rozpadem izotopů americia nebo beryllia. Využívá zejména zpomalení vyzářených neutronů jádry vodíku, přičemž míra zpomalení je závislá na množství přítomných jader. Většina vodíku se v půdě vyskytuje právě v kombinaci s kyslíkem (H_2O – voda) a míra zpomalování neutronů je tedy ovlivněna zejména vlhkostí

půdy. Množství zpomalených neutronů je posléze měřeno senzorem, který provede převod na vhodný elektrický signál. [7]

Neutronová metoda je typická velmi dobrou přesností a stálostí měření, metoda zároveň není ovlivněna salinitou půdy. Měření je zároveň prováděno v poměrně velkém objemu půdy (koule o poloměru až 40 cm).



Obrázek 5 – Nadzemní část neutronové sondy půdní vlhkosti [12]

Zásadní nevýhodou je práce s radioaktivním materiálem. Byť se jedná o velmi malé dávky záření, sondu mohou obsluhovat pouze zvlášť vyškolení pracovníci. Navíc se zpravidla jedná o poměrně velký přístroj s vysokými pořizovacími náklady, tato metoda tak není vhodná pro vytvoření měřicí sítě s vyšším počtem současně měřených lokalit. Navíc je zapotřebí provádět kalibraci pro daný typ půdy.

2.1.6 Metoda založená na gama záření

Gamaskopická metoda je založena na rozptylu a pohlcení gama záření měřeným materiálem. Míra obsažené vody v půdě má na množství pohlcení a rozptýlení značný vliv, navíc lze gama záření formovat do tvaru úzkého paprsku, čímž je možné měřit jednotlivé části půdního vzorku zvlášť. Tato metoda je však oproti předchozí metodě využívána zejména v laboratorním či velmi dobře kontrolovaném prostředí a pro zemědělské použití je tak zcela nevhodná.

Byť metoda přináší řadu pozitiv, například dobrou přesnost a opakovatelnost měření, dalšímu rozšíření brání zejména vysoké pořizovací náklady.

2.1.7 Metoda zjišťování zpoždění signálu po průchodu zeminou

Tato metoda se také označuje jako metoda pulsní reflektometrie (TDR). Metoda původně vznikla pro měření poruch kabelů. Do měřicích elektrod je pouštěno pulsní elektromagnetické vlnění, které se na konci elektrod částečně odrazí, přičemž je měřena rychlost jeho šíření, která je zásadně ovlivněna množstvím vody přítomné v půdě. [1]

Výhodou metody je vysoká přesnost měření, která není ovlivněna typem půdy a ani běžným zasolením. Některé senzory navíc tuto metodu kombinují s metodou měřící elektrickou vodivost půdy, z jednoho senzoru tak lze současně získat více údajů vedoucích k ještě přesnějšímu měření.

Velkému rozšíření v současné době brání zejména vyšší cena. Metoda jako taková má však nevýhodu v nižším objemu měřené půdy, a to pouze v těsné blízkosti podél elektrod.



Obrázek 6 – Senzor využívající TDR metodu [13]

2.1.8 Metoda využívající měření fázového posunu signálu po průchodu zeminou

Úpravou metody pulsní reflektometrie vznikla metoda měřící fázový posun mezi vysílaným a přijímaným signálem. Rychlost šíření elektromagnetických vln je závislá na množství vody obsažené v půdě. U senzoru jsou zpravidla použity dvě elektrody, jedna vysílací a druhá přijímací, přičemž objem měřené půdy je dán jejich velikostí a vzdáleností.

Výhodou je jako u předchozí metody relativně vysoká přesnost měření, současně jsou senzory zpravidla levnější. Navíc tato metoda umožňuje měřit velký objem půdy. Nevýhodou je ale citlivost na zasolení půdy a potřeba kalibrace pro daný typ půdy. Oproti řadě jiných metod je zde vzhledem k velikosti senzorů nutný značný zásah do měřeného místa, což přináší značné riziko ve formě porušení přirozeného půdního profilu.



Obrázek 7 – Dvojice senzorů VIRIRB před zkušební instalací

2.2 Výběr vhodné metody pro zamýšlený měřicí systém

Před provedením samotného výběru vhodné metody je potřeba stanovit požadavky na takovýto systém, případně rovnou stanovit nutné, žádoucí a nežádoucí vlastnosti vytvářeného senzoru.

2.2.1 Požadavky a předpokládané použití navrhovaného senzoru

Vzhledem ke snaze o vytvoření kompaktního a snadno použitelného měřicího systému není možné využít všechny uvedené metody. Navrhovaný měřicí systém je zamýšlen zejména k instalaci na pole a do sadů, případně i vinic, kde se předpokládá použití až desítek nezávislých sond na relativně malé ploše. Je tedy potřeba se vyvarovat metodám, které by mohly přinést vzájemné ovlivňování jednotlivých senzorů, vedoucích k nepřesnosti měření. Dalším z požadavků na samotný měřicí systém je potřeba měření vlhkosti půdy v různých hloubkách. Některé metody neumožňují umístění více snímačů nad sebe, což přináší zásadní nevýhodu při instalaci takového měřicího systému, neboť je potřeba provádět mnohonásobně více výkopů či vrtů pro umístění snímačů.

Jedním z kritických parametrů měřicího systému je míra zásahu v místě měření jednotlivých snímačů. Například pro umístění senzoru VIRRIB využívajícího fázový posun elektromagnetických vln je potřeba vyhloubit otvor o průměru okolo 50 cm. Při umístění takového senzoru do hloubky například 80 cm nevyhnutelně dojde k silnému narušení přirozeného půdního profilu. Zpětně umísťovanou půdu je tak potřeba nejen zhutňovat, ale i navracet ve správném pořadí dle profilového složení půdy. To celou instalaci senzoru ztěžuje, zároveň je pro umístění senzoru potřeba více času.

Jelikož je navrhovaný měřicí systém zamýšlen zejména pro zemědělské využití, není kladen důraz na absolutní přesnost změřené hodnoty, ale spíše na dostatečné rozlišení senzoru a také stálost naměřených výsledků – tedy dobrou opakovatelnost měření. Samozřejmostí je teplotní nezávislost senzoru. Zejména v případě sadů zároveň také není žádoucí potřeba demontáže senzoru v zimním období. Nejenže není vhodné neustále narušovat kořenový systém stromů častou instalací senzorů, ale zároveň je vhodné monitorovat množství obsažené vody v půdě i mimo vegetační období. Obecně by měl být interval mezi potřebnými zásahy ze strany obsluhy co nejdelší.

V neposlední řadě je potřeba brát v potaz energetickou náročnost měření. Navrhovaný senzor bude napájen z integrované baterie či akumulátoru tak, aby vznikl skutečně bezdrátový měřicí systém. Interval měření je předpokládán v řádu desítek minut či jednotek až desítek hodin, není tedy žádoucí, aby vybraná metoda vyžadovala neustálé napájení nebo dlouhý čas k provedení samotného měření.

Při návrhu senzoru je rovněž třeba dbát na snadnou reprodukovatelnost výsledků v případě sériové výroby senzorů, tedy na možnost vytvoření desítek či stovek senzorů se stejným chováním a pokud možno totožnou měřicí charakteristikou. Předpokladem sice je kalibrace každého senzoru zvlášť, v ideálním případě by však měla stačit pouze dvoubodová kalibrace – tedy například při umístění daného senzoru na vzduchu a při ponoření do vody.

2.2.2 Vybraná metoda

Vzhledem k uvedeným požadavkům se jako nejvhodnější jeví použití kapacitní metody. Dle teoretických předpokladů lze touto metodou dosáhnout dostačeného rozlišení v rámci malé velikosti elektrod a celého senzoru, současně při zachování velmi nízké spotřeby celého zařízení.

Zásadní otázkou je konstrukce elektrod – zejména jejich tvar, plocha a vzdálenost. Pro dosažení velkého rozdílu kapacity vyprahlé a přemokřené půdy je potřeba co možná největší plochy elektrod,

zároveň je potřeba elektrody umístit relativně blízko sebe – dle konstrukce obvykle jednotky milimetrů až desítky centimetrů. V praxi je možno se setkat v zásadě se dvěma typy konstrukce elektrod.

U prvního typu jsou elektrody realizovány vytvořením motivu s určitým tvarem elektrod, umístěného na klasickém plošném spoji. Tento typ provedení elektrod je v zásadě vhodný pouze pro instalaci vpichem do půdy, což může být u některých typů půd překážkou. Rovněž může přítomnost kamenů, štěrku či hrubšího písku nejen zásadně ovlivnit naměřenou hodnotu, ale také může vést k poškození povrchu senzoru a jeho rychlejší degradaci. Samotný plošný spoj s motivem elektrod je obvykle protáhlého tvaru – v praxi se běžně používá délka okolo 20 cm při šířce zpravidla nepřesahující 5 cm. S rostoucí plochou elektrod pak roste i naměřená kapacita a celkově se zlepšují základní vlastnosti senzoru, jako jsou rozlišení a stabilita (dobrá opakovatelnost) měření. S rostoucí velikostí elektrod ale ztrácíme schopnost měření v rámci jedné půdní vrstvy, neboť elektrody o délce například 30 cm z principu zprůměrují hodnotu půdní vlhkosti v celé této hloubce a tím dojde ke zkreslení informací. Typickým případem může být situace po dešti, kdy senzor umístěný blízko povrchu zaregistruje náhlý vzrůst půdní vlhkosti a například tak odstaví zavlažování. Přitom půdní vlhkost v hloubce okolo 20 cm zůstane prakticky beze změny a rostliny s hlubšími kořeny tak mohou uvadat, i když instalovaný senzor hlásí dostatek vody v půdě. Očividným řešením tohoto problému je umístění senzoru horizontálně, zde ale přicházíme o zásadní výhodu oproti některým jiným metodám – rychlost a jednoduchost instalace, neboť je potřeba při umístění senzoru do větších hloubek provést výkop. S tím následně přichází nutnost zpětného zasypávání výkopu vrstvami půdy ve správném pořadí a rovněž je potřeba místo instalace dostatečně udusat.

Dalším problémem může být nedokonalý kontakt elektrod s půdou. Při vpichování do půdy obvykle dojde odtlačení půdy z těsné blízkosti měřicích ploch nejen vlivem prohnutí senzoru, ale také pohyby ze strany instalující osoby. Přitom právě potřeba velmi dobrého kontaktu senzoru s půdou je pro tuto metodu typická.

Závažným problémem je koroze elektrod takového senzoru, neboť nepájivá maska plošného spoje sice poskytuje ochranu čelní i zadní strany senzoru, nicméně hrana plošného spoje bývá zpravidla neošetřena. Vzhledem k nosnému materiálu, kterým obvykle bývá skelná tkanina, ale postupem času dochází k vzlínání vlhkosti nejen pod nepájivou masku, ale i pod nanesenou měděnou fólii, která koroduje a bobtná. Výsledkem je postupná degradace elektrod, která ale není z naměřených dat patrná – koroze elektrod se projevuje stejně jako vysychání půdy. Při napojení na závlahový systém tak ve výsledku může na pozemku způsobit značné škody systematickým přemokřováním dané lokality. Logickým opatřením pro ochranu senzoru je hydrofobní antikorozi ošetření povrchu senzoru. V praxi je často prováděno namočení senzoru do gumoasfaltu, který degradaci elektrod zabrání nebo alespoň značně zpomalí. Takto ošetřené elektrody ale vykazují značně menší citlivost, a navíc je po aplikaci povrchové ochrany potřeba senzor znova kalibrovat.



Obrázek 8 – Nevhodně konstruovaný senzor, vlhkost pronikla hranou desky plošných spojů [14]

Druhý typ používaných senzorů je určen pro vložení do trubky umístěné v půdě. Tento typ konstrukce přináší řadu výhod. Instalace takovýchto senzorů spočívá pouze ve vyvrtání otvoru o příslušném průměru do půdy v dané lokalitě a následném vložení samotného senzoru dovnitř. Další výhodou je možnost měření vlhkosti půdy ve více hloubkách v jednom místě (v rámci jednoho vrtu), ve výsledku tak není potřeba provádět výkop a instalaci násobně více senzorů. Kontrola či případná oprava senzoru současně nevyžaduje vykopání senzoru tak, jako je tomu u jiných metod – zpravidla stačí pouze vysunout vnitřní část senzoru, přičemž instalovaná trubice zůstane v půdě. V praxi je navíc většina senzorů tohoto typu rozdělena na jednotlivé segmenty, přičemž snímačů bývá osazeno více, zatímco řídicí elektronika bývá umístěna v horní části těla senzoru. Toto rozdělení na jednotlivé segmenty přináší výhodu ve snadném rozšiřování sondy – v případě potřeby změnit počet nebo hloubku měřících bodů lze jednoduše doplnit další snímače, případně upravit hloubku umístění doplněním distančních bloků. Navíc v případě poruchy jednoho snímače jej lze jednoduše vyměnit ve velmi krátkém časovém okamžiku a bez potřeby jakýchkoli výkopových prací.



Obrázek 9 – EnviroSCAN – profilová vlhkostní sonda sestávající z jednotlivých segmentů [15]

3 Návrh a realizace systému pro měření půdní vlhkosti

V rámci této práce se jako nejvhodnější jeví použití senzoru vlhkosti půdy založeném na kapacitní metodě měření, přičemž konstrukce bude sestávat z jednotlivých senzorických segmentů pro měření v různých hloubkách. Předpokladem je použití společné řídící elektroniky pro všechny segmenty, která bude kromě zajištění obsluhy senzorů také obstarávat komunikaci s okolím, tedy odesílání naměřených hodnot pro zpracování mimo tělo navrhované sondy.

3.1 Mechanická konstrukce těla sondy

Výchozím bodem návrhu senzoru bylo vhodné zvolení velikosti a tvaru potřebných měřicích elektrod. Vzhledem k předpokládanému válcovému tělu sondy bylo zapotřebí určit vhodný průměr tak, aby měly elektrody dostatečnou plochu při co nejnižší šířce – délka elektrod pak odpovídá vnitřnímu obvodu válce. Z konstrukčního hlediska těla senzoru se jako nejvhodnější jeví plastová trubka. Ve stavebnictví se používají různá provedení – vybrána nakonec byla odpadová trubka (označení HT) z polypropylenu o vnějším průměru 50 mm, neboť právě tato velikost představuje dobrý kompromis mezi dostupným vnitřním prostorem pro elektroniku a dostatečnou mechanickou pevností pro montáž. Výrobce těchto trubek navíc garantuje dlouhodobou teplotní odolnost (do 100 °C), polypropylen zároveň velmi dobře odolává chemikáliím a nehrozí tedy degradace těla senzoru například při umístění v kyselých půdách. Jediným problémem je náchylnost materiálu vůči UV záření. V praxi sice u HT trubek umístěných v exteriéru nedochází k úplnému rozpadu, dochází však k jejich křehnutí a odbarvení (blednutí). Dle atmosférických podmínek však k těmto změnám dochází v řádu let. Základní barva trubek je šedá, je však možno pořídit i jiné barvy, nejčastěji bílou. U navrhovaných sond se však předpokládá barevný nátěr dle potřeby zákazníka – například nátěr reflexní oranžovou barvou může pomoci technice (traktory, sekačky, ...) vyhnout se samotným sondám při práci v dané lokalitě, zatímco v jiných případech může být sonda opatřena zelenohnědým maskovacím vzorem pro nenarušení krajinného rázu a znesnadnění jejich nalezení ze strany nežádoucích osob. Takovýto nátěr pak poskytne dodatečnou ochranu materiálu vůči UV záření, čímž prodlouží jeho životnost.

V neposlední řadě je velkou výhodou plná recyklovatelnost materiálu těla sondy. Po konci životnosti tedy navrhované sondy nebudou zatěžovat životní prostředí na skládkách, ale po rozebrání může být materiál dále využit. Zajímavostí pak je tvrzení výrobce trubek, že polypropylen při hoření na vzduchu neprodukuje škodlivé látky, vzniká pouze CO₂ a vodní pára. [16]

Všechny konstrukční a pomocné díly jsou navrhovány s myšlenkou co možná nejsnazší výroby pomocí 3D tisku – tedy potřeby minima podpěr a velké styčné plochy s tiskovou podložkou tiskárny. Rovněž se předpokládá použití tiskového materiálu PETG, který je teplotně dobře stabilní a mechanicky pevný.

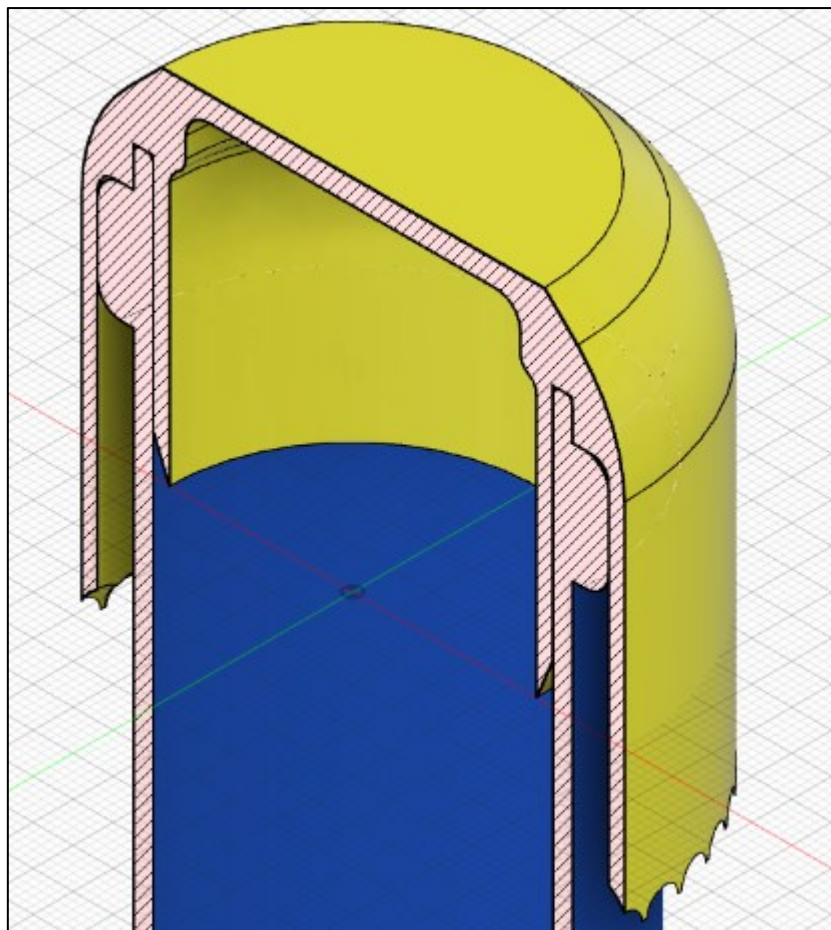
Dovnitř těla sondy jsou při instalaci vloženy sáčky pro pohlcování vzdušné vlhkosti za účelem omezení koroze elektroniky a kovových dílů vlivem nadměrné vlhkosti uvnitř uzavřené trubky.

3.1.1 Horní část těla senzoru

Jelikož jsou koncovky trubky průměru 50 mm běžné dostupné, byly zpočátku využívány a upravovány pro konkrétní potřebné využití – například vyvrtáním otvoru pro anténu. Jelikož jsou ale tyto koncovky určeny k zabránění úniku kapaliny zevnitř trubky ven, nikoli naopak, jak je v tomto případě potřeba, byly tyto krytky překryty vrstvou silikonu. Vzhledem k tepelné roztažnosti plastu, a ne

vždy dokonalému přilnutí silikonu k povrchu krytky však již po krátkém čase docházelo k postupnému vnikání vody dovnitř trubky. Proto bylo přistoupeno k návrhu a následnému 3D tisku vlastních krytek, přímo určených pro konkrétní účely.

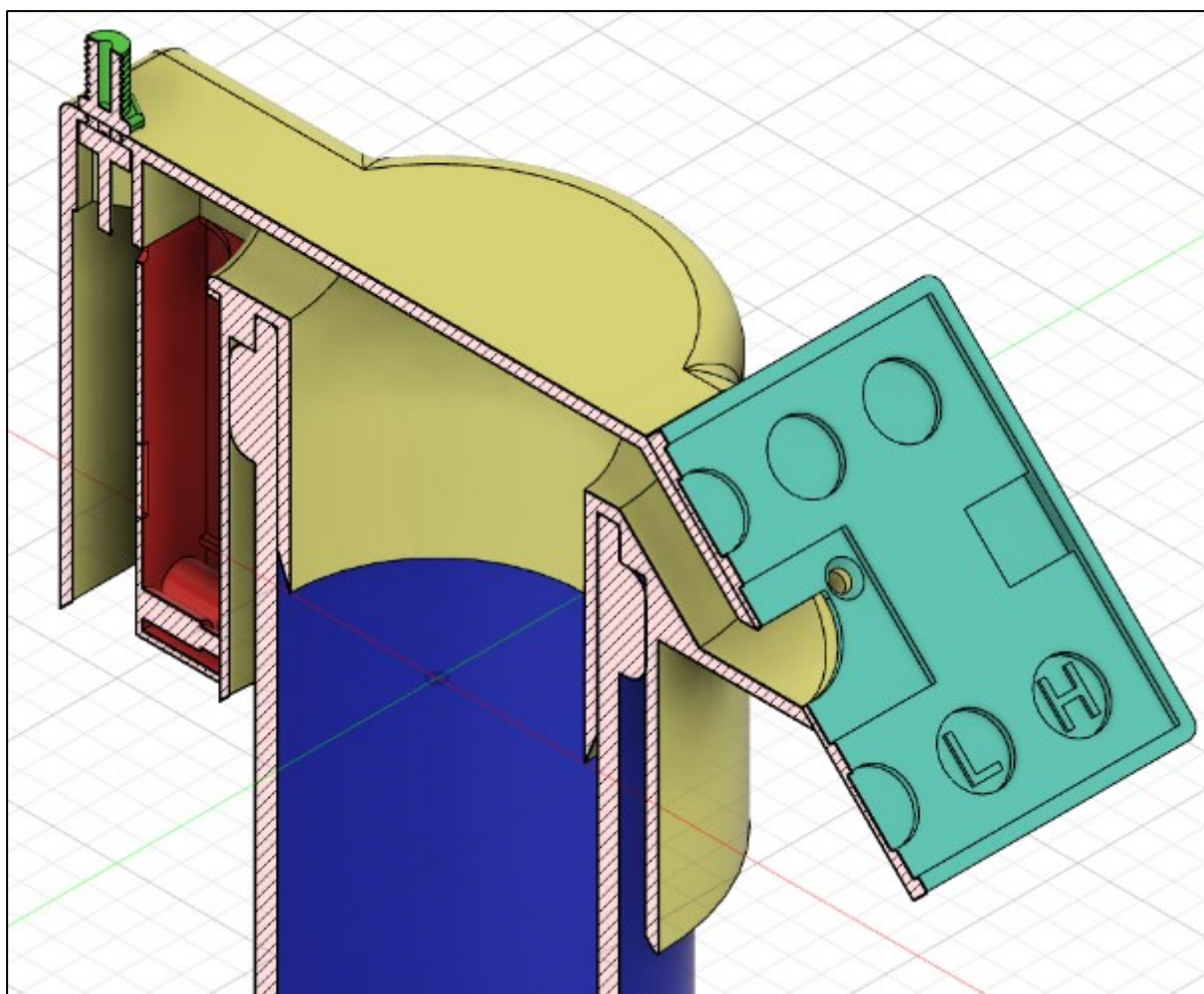
Navrženy a odzkoušeny byly celkem 4 typy horního zakončení těla sondy – úplně uzavřené, pouze s otvorem pro anténu, pouze se senzorickou schránkou a multifunkční zakončení umožňující připojení externí antény, senzorické schránky, a navíc i fotovoltaického panelu.



Obrázek 10 – Řez jednoduché vrchní krytky trubky

Jednoduchá vrchní krytka svým tvarem představuje obrácenou misku (v obrázku 10 žlutě). Vrchní část trubky (modře) je krytkou kompletně překryta a déšť tak do trubky nemá možnost proniknout. Spodní část krytky je opatřena zubovými výstupky, které podporují vznik kapek a jejich následné oddělení od krytky bez dotyku samotné trubky. Tímto by mělo být zabráněno stékání vody po stěně trubky až k samotným senzorům, čímž by došlo ke zkreslení naměřených hodnot.

Díly vyrobené pomocí amatérského 3D tisku zpravidla nejsou považovány za vodotěsné, proto byly všechny krytky povrchově ošetřeny průhledným lakem, který by měl případné mikro mezery mezi vrstvami vyplnit a zabránit tak průniku vody skrze stěny vyrobeného dílu. Použitý lak by měl rovněž umožnit lepší krytí a odolnost případného krycího barevného nátěru.

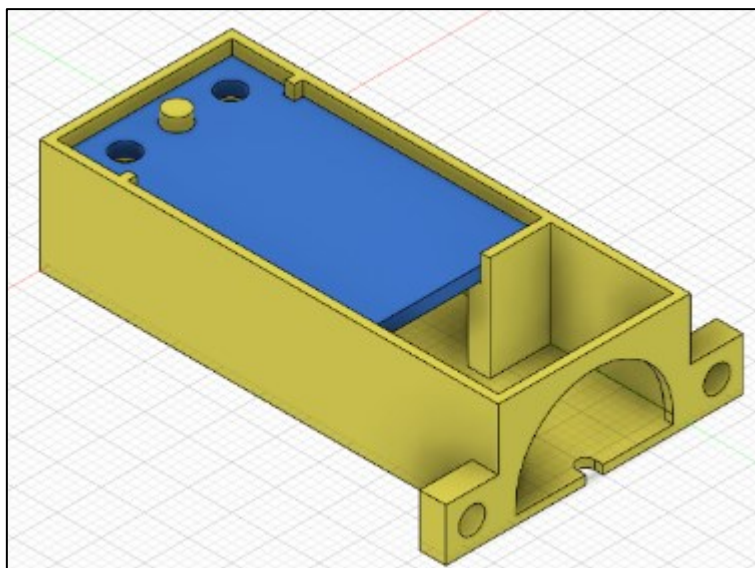


Obrázek 11 – Řez multifunkční vrchní krytky trubky

Nejsložitější krytkou je verze kombinující všechny plánované prvky sondy půdní vlhkosti. V obrázku 11 je tyrkysovou barvou zvýrazněn držák fotovoltaického panelu o rozměrech 80 × 55 mm. Držák je tištěn samostatně a se samotnou krytkou (žlutě) je spojen pomocí dvou šroubů M3 se zápusťnou hlavou. Potřebná kabeláž je vedena vnitřním otvorem, který svým sklonem zabraňuje případnému vniknutí vody – místo spoje těchto dílů je však při montáži potřeno vrstvou silikonu, který přirozeně vnikne i dovnitř kabelového otvoru, takže by k vniku vody dovnitř tohoto otvoru vůbec nemělo dojít.

V zadní části se nachází krabička (červeně) pro umístění DPS se senzory. Krabička je v místě držena pomocí dvou samořezných šroubů v otvorech o průměru 2 mm.

Otvorem v zadní části je v případě potřeby prostrčen konektor externí antény. Koaxiální kabel poté prochází výřezem ve stěně senzorické krabičky a je společně s kabeláží senzorů veden otvorem do středové části trubky, kde již následně bez překážek vede k řídicí desce sondy. Anténní konektor byl záměrně umístěn mimo hlavní středovou část krytky, neboť v průběhu testování opakovaně docházelo k průniku vody právě v těsném okolí tohoto konektoru (i přes umístění dodatečného těsnění). Umístěním konektoru do zadní části je tento problém odstraněn, neboť i v případě prosakování vody okolo nebo skrze konektor zůstane tato voda mimo ostatní elektronické části a je bez potíží svedena ven, zcela mimo prostor samotné krytky trubky.



Obrázek 12 – Krabice pro umístění DPS se senzory

Krabice zajišťující mechanické krytí atmosférických senzorů (v obrázku 12 žlutě) je určena přímo pro navrženou senzorickou desku plošných spojů (modře) – jejich mechanické spojení zajišťují dva samořezné šrouby. V přední části krabice se nachází místo pro přebytečnou délku kabeláže vedoucí k samotným senzorům. Zářez ve spodní části je určen pro průchod koaxiálního kabelu spojující řídicí desku sondy s externí anténou.



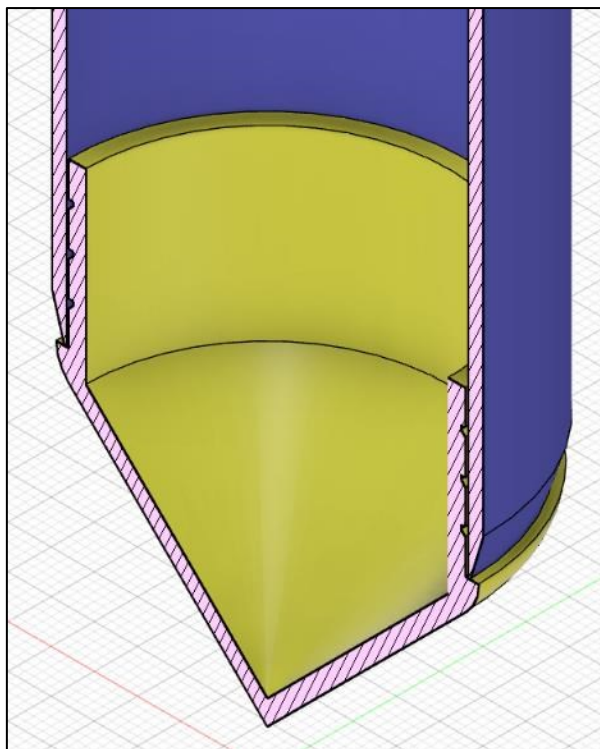
Obrázek 13 – Detail tří nejčastějších horních zakončení těl senzorů po nátěru

3.1.2 Spodní část těla senzoru

Ve spodní části těla sondy se nachází pouze špička (v obrázku 14 žlutě) pro usnadnění instalace. Jelikož toto zakončení nemůže mít průměr přesahující průměr samotné trubky (modře), muselo být přistoupeno k umístění těsnění z vnitřní strany trubky. Za tímto účelem byly v místě vytvořeny tři sousedé kruhové výřezy, do kterých je možno vložit těsnící O kroužky. Alternativou je použití silikonu po celé ploše styku obou dílů. Samotná špička je z vnitřní strany lakována za účelem lepší odolnosti vůči vodě.

Po umístění špičky do spodní části trubky jsou obě části společně přelakovány tak, aby došlo k lepší ochraně spoje proti vniknutí vody z půdy směrem dovnitř trubky.

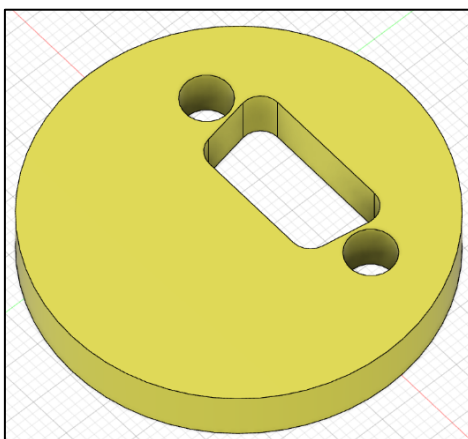
Alternativou k umístění špičky může být nahřátí, stlačení a následné zatavení samotné trubky. Nicméně vzhledem ke složitosti a potřebnému vybavení byla tato myšlenka opuštěna a dále nebyla rozvíjena. Rovněž takto upravené tělo senzoru nelze v případě potřeby opětovně otevřít.



Obrázek 14 – Spodní zakončení trubky

3.1.3 Přepážky mezi jednotlivými senzory

Ve snaze o znesnadnění cirkulace vzduchu uvnitř těla sondy byly navrženy plastové přepážky, určené pro umístění na konektory jednotlivých senzorů. Tyto přepážky těsně přiléhají na vnitřní stěnu trubky a omezují tak proudění vzduchu v rámci sondy. To je důležité zejména při východu a západu slunce, kdy dochází k prudké změně teploty povrchu a následně i uvnitř sondy, přičemž ne všechny komponenty mění teplotu současně, čímž může dojít k dočasnému zkreslení naměřených hodnot půdní vlhkosti.



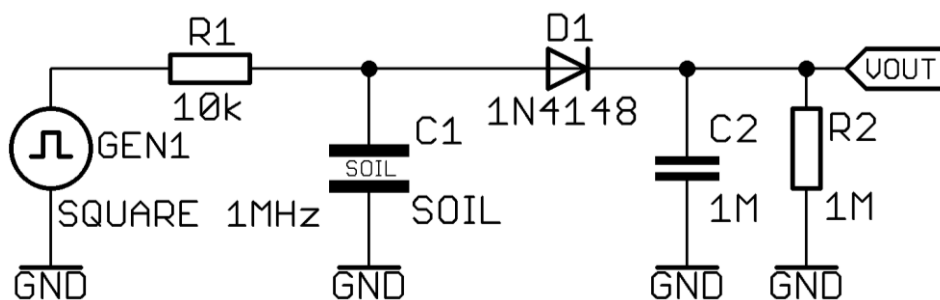
Obrázek 15 – Přepážka mezi jednotlivými senzory

3.2 Výběr vhodného zapojení senzoru

Před začátkem návrhu výsledné podoby snímače bylo zapotřebí vyzkoušet jednotlivá vybraná navrhovaná zapojení při reálném měření. Možností zapojení je nespočet, v zásadě se ale dají rozdělit dle typu výstupního signálu na měření analogové (typicky napětí) nebo digitální hodnoty (typicky frekvence nebo délka pulzu). Analogové hodnoty je poté kvůli dalšímu zpracování a odesílání mikrokontrolérem potřeba digitalizovat.

3.2.1 Zkušební verze 0.1

Prvním pokusem o sestavení kapacitního senzoru půdní vlhkosti bylo umístění dvou surových desek plošných spojů (bez odleptaného motivu) do nádoby s hlínou – desky byly opatřeny izolací ve formě osvíceného (vytvrzeného) negativního fotorezistu (materiál Photec 2050, tloušťka 50 µm) a následně ještě umístěny do plastových sáčků (materiál LDPE, tloušťka 50 µm). Tato konstrukce sice neodpovídá plánovanému návrhu pro umístění do plastové trubky, nicméně i tak bylo možno vyzkoušet základní chování půdy jako dielektrika v měřeném kondenzátoru. Zásadním zjištěním byla výrazná změna kapacity i po přidání malého množství vody. S dalším přidáváním vody se již velikost změny zmenšovala, bylo tak zřejmé, že množství vody nebude přímo úměrné kapacitě, ale že se bude jednat o silně nelineární závislost.



Obrázek 16 – Zkušební zapojení senzoru verze 0.1

Základem senzoru je frekvenční generátor signálu obdélníkového tvaru, který je veden na RC člen, tvořený rezistorem o zvolené hodnotě a měřeným kondenzátorem – tímto je vytvořena dolnofrekvenční propust. Mezní frekvence filtru je pak dána následujícím vztahem: [47]

$$f_{\text{mezní}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C_1} \quad (3)$$

kde:

- $f_{\text{mezní}}$ – mezní frekvence filtru (Hz),
- R_1 – hodnota rezistoru R_1 (Ω),
- C_1 – hodnota kondenzátoru C_1 (F).

Ze vzorce je patrné, že zjišťovaná frekvence je nepřímo závislá na hodnotě použitého rezistoru a měřeného kondenzátoru. V tomto zapojení je hodnota rezistoru konstantní, na mezní frekvenci má tedy vliv pouze změna měřené kapacity. Obdélníkový signál generátoru je tedy po průchodu filtrem utlumen v závislosti na vlhkosti půdy. Tento tlumený signál je poté veden přes diodu D_1 , zabráňující zpětnému vybíjení kondenzátoru C_2 přes vnitřní odpor generátoru, do jednoduchého detektoru špiček, tvořeného paralelním zapojením rezistoru R_2 a kondenzátoru C_2 . Výstupem celého řetězce je tedy analogová hodnota napětí, která odpovídá hodnotě půdní vlhkosti měřeného vzorku. Hodnoty

součástek byly experimentálně měněny pro dosažení co možná největšího dynamického rozsahu, frekvence generátoru byla experimentálně zvolena na 1 MHz.

Při pokusech se však ukázalo, že zapojení využívající měření napětí není vhodné, neboť se při použití řídicího mikrokontroléru do měřicího řetězce dostává další prvek – A/D převodník, který s sebou přináší další neduhy, zejména však nízké efektivní rozlišení a špatnou opakovatelnost měření. Dalším problémem je přílišná a rozdílná teplotní závislost použitých prvků zapojení, která značně ztěžuje kalibraci takového senzoru a jeho následnou sériovou výrobu.



Obrázek 17 – Testování principu funkce kapacitního senzoru vlhkosti půdy

3.2.2 Zkušební verze 0.2

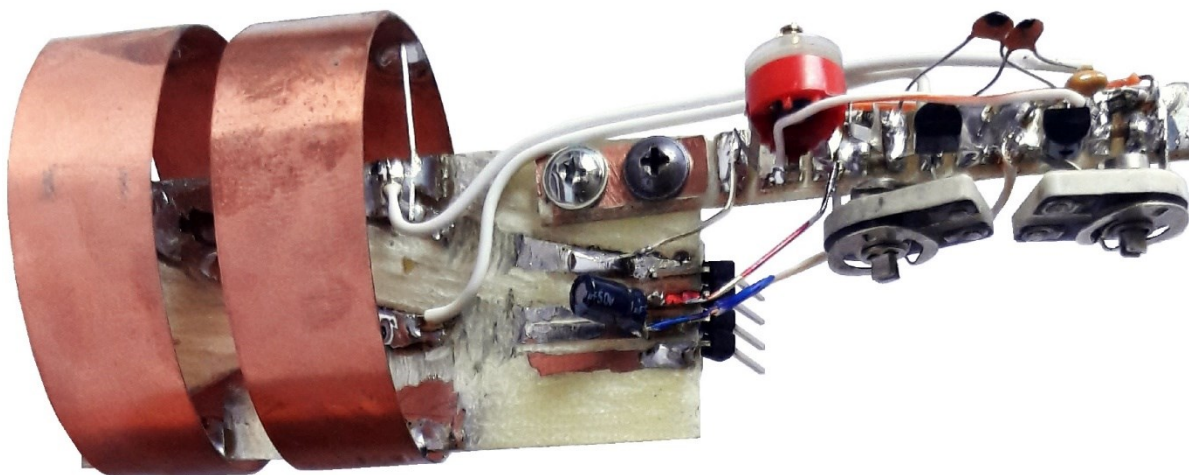
Zapojení ve verzi 0.2 obvodově odpovídá verzi 0.1, rozdílem je ale konstrukce elektrod. Pro umístění do plastové trubky o vnějším průměru 50 mm byly vytvořeny dva kroužky z měděného pásu, běžně prodáváného pod názvem „zemnicí pásek“. Průměr kroužků je 46 mm, což odpovídá vnitřnímu průměru použité plastové trubky. Vzájemná mezera mezi kroužky (elektrodami) pak činí 5 mm.

Tato verze senzoru prokázala, že měření půdní vlhkosti skrze plastovou stěnu kapacitní metodou sice možné je, ale velkým problémem je velmi nízká kapacita takto vytvořeného kondenzátoru – digitální měřák kapacity (UNI-T UT195M PRO) naměřil okolo 14 pF v případě umístění senzoru na vzduchu, následně po ponoření utěsněné trubky do nádoby s vodou pak 20 pF. Umístění do vyprahlé a poté přemokřené hlíny pak změnilo kapacitu na 17, respektive 19 pF. Naměřené hodnoty jsou pouze orientační, neboť je v nich započtena i kapacita přívodních kabelů a měření je zkresleno nedostatečným rozlišením použitého měřicího přístroje. I přesto je patrné, že pro vytvoření senzoru s požadavkem na rozlišení v řádu desetin procenta půdní vlhkosti, bude takový senzor muset být schopen měřit kapacitu kondenzátoru s rozlišením v řádu jednotek fF. Pokud požadujeme od senzoru rozlišení vyšší, je potřeba měřit rozdíly v řádu stovek či desítek aF.

3.2.3 Zkušební verze 0.3

Základním cílem této verze byla snaha o kompaktnost zařízení a zmenšení vnějších vlivů – zejména pak odstranění dlouhých přívodních vodičů k elektrodám. Pro splnění těchto cílů bylo zapotřebí nahradit stolní frekvenční generátor lokálním oscilátorem. Vzhledem k jednoduchosti zapojení byl pro generování signálu obdélníkového tvaru zvolen dvoutranzistorový multivibrátor, tedy astabilní klopný obvod, jehož frekvence byla pomocí kapacitního trimru nastavena na 650 kHz při umístění elektrod mimo testovací nádobu s hlinou. Při vyšších frekvencích klopný obvod přestával fungovat spolehlivě a docházelo k jeho ustálení v jednom ze stavů.

Výstupní veličinou tohoto zapojení je frekvence oscilátoru, která se mění v závislosti na kapacitě kondenzátoru, a tedy množství vody přítomné v půdě. Je tak v podstatě vytvořen měřicí převodník kapacity na frekvenci. Měření frekvence digitálního signálu odbourává potřebu A/D převodníku v měřicím řetězci a s ním spojené neduhy zapojení, zejména nízké efektivní rozlišení a náchylnost k rušení. V případě měření vysoké frekvence (okolo 1 MHz) je rozlišení dáno délkou měření (počítání pulzů za daný čas), kterou lze snadno upravit pro aktuální potřeby. V případě tohoto zapojení byl použit externí laboratorní čítač.



Obrázek 18 – Senzor verze 0.3

V průběhu testování se ale toto zapojení ukázalo jako nevhodné, jednak nízkou dostupnou frekvencí a rovněž extrémní teplotní a napěťovou závislostí. Nastavení a zkouška funkce probíhala při teplotě vzduchu 22 °C, při umístění do teploty 10 °C postupně docházelo k zásadní změně frekvence přesahující původní rozsah, až do úplného zastavení oscilátoru. Jediným řešením bylo snížení základní generované frekvence, čímž ale došlo k výraznému snížení již tak malého rozlišení měření. Proto byly další snahy o vývoj zařízení založeného na tomto zapojení ukončeny.

3.2.4 Zkušební verze 0.4

Další verze se liší v použitém generátoru obdélníkového signálu. Základem je velmi dobře známý integrovaný obvod NE555 v zapojení astabilního klopného obvodu. Generovaná frekvence byla po předchozích zkušenostech zvolena na hodnotu 1 MHz při umístění mimo půdu. Pro měření výstupní frekvence pak byl použit stolní laboratorní digitální multimetr SIGLENT SDM3055.

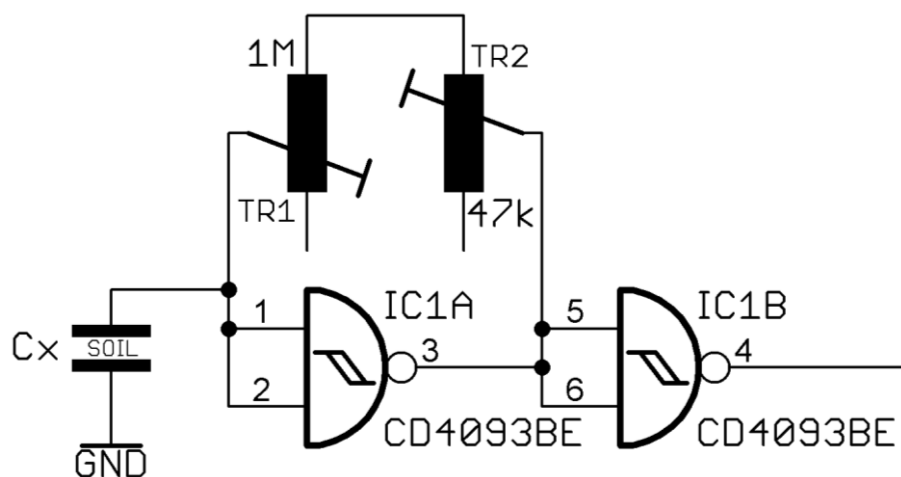
Takto navržený senzor fungoval spolehlivě, byť byl ale dle očekávání tak jako předchozí zapojení značně teplotně závislý. Podstatnou závislost na teplotě ale vykazoval pouze jeden prvek celého zapojení – integrovaný obvod NE555. Teplotu toho čipu, respektive jeho blízkého okolí však lze

poměrně jednoduše měřit přidáním teploměru, například hojně využívaného integrovaného obvodu DS18B20. Ve výsledku by tak bylo možné provést kalibraci a získanou kalibrační křivku poté přepočítávat dle naměřené teploty. Složitost kalibrace je v přímém kontrastu s jednoduchostí zapojení.

Rozhodujícím důvodem k ukončení dalšího vývoje senzoru v tomto zapojení pak byla malá citlivost na obsah vody v půdě měřeného vzorku a s tím spojené nízké rozlišení měření.

3.2.5 Zkušební verze 0.5

Jelikož se v předchozích zapojeních ukázalo jako výhodné použití astabilního klopného obvodu, další vývoj probíhal ve stejném duchu, došlo pouze ke změně použitého integrovaného obvodu sloužícího jako základ generátoru. V nepájivém kontaktním poli byly postupně vyzkoušeny různé obvody technologie CMOS, které jsou charakteristické vysokou vstupní impedancí, která je klíčová k dosažení potřebné citlivosti senzoru. Nakonec se jako vhodné ukázaly integrované obvody CD4001, CD4011 a CD4093, které byly postupně zkoušeny z hlediska citlivosti, náchylnosti na rušení a v neposlední řadě také teplotní stability. Jako nejvhodnější se při testování ukázal obvod CD4093BE.



Obrázek 19 – Schéma generátoru pro senzor verze 0.5

Použitý integrovaný obvod se skládá celkem ze čtyř hradel typu NAND s hysterezí (Schmittův klopný obvod). Jedno hradlo je po spojení vstupů použito jako invertor, v jehož zpětné vazbě se nachází dva odporové trimry. TR_1 slouží k nastavení oscilační frekvence, pomocí trimru TR_2 lze pak požadovanou frekvenci jemně doladit. Signál vedený ve zpětné vazbě poté nabíjí kondenzátor tvořený souosými kroužkovými elektrodami umístěnými v plastové trubce. V závislosti na kapacitě, tedy na obsahu vody v měřené půdě, se poté mění frekvence oscilátoru. Druhé hradlo je opět zapojeno jako logický invertor a slouží k proudovému posílení výstupu generátoru, který tak již není ovlivňován připojenou zátěží ve formě laboratorního měřáku frekvencí obdobně, jak tomu bylo v předchozích případech.

Toto zapojení vykazuje dobrou citlivost na množství vody půdě, testováním a odladěním zapojení bylo možné získat rozlišení okolo 0,1 % půdní vlhkosti. Dlouhodobá stabilita poté dosahovala 1 %. Stejně jako tomu bylo u předchozích případů, však zásadní překážku tvoří značná teplotní závislost generované frekvence. Řešení tohoto problému je jistě možné provést přímo v obvodu, tím by ale došlo ke zvýšení složitosti s nejistým výsledkem. Proto bylo navrženo obdobné řešení jako u verze 0.4, tedy umístění teploměru do těsné blízkosti pouzdra integrovaného obvodu generátoru, přičemž teplotní kompenzace bude provedena programově v mikrokontroléru, který současně zajišťuje měření frekvence samotného generátoru.

Zásadním poznatkem je silná závislost generované frekvence na zvoleném napájecím napětí. Obecně s rostoucím napětím rostla i citlivost senzoru, současně ale značně rostla i spotřeba takového zapojení. V rámci budoucích verzí je proto potřeba najít kompromis mezi velikostí použitého napájecího napětí, respektive energetickou spotřebou a požadovanou citlivostí, tedy rozlišením senzoru. Důležitá je i teplotní a časová stabilita použitého napájecího zdroje, neboť kolísání napětí v průběhu měření má za následek zhoršení přesnosti měření.

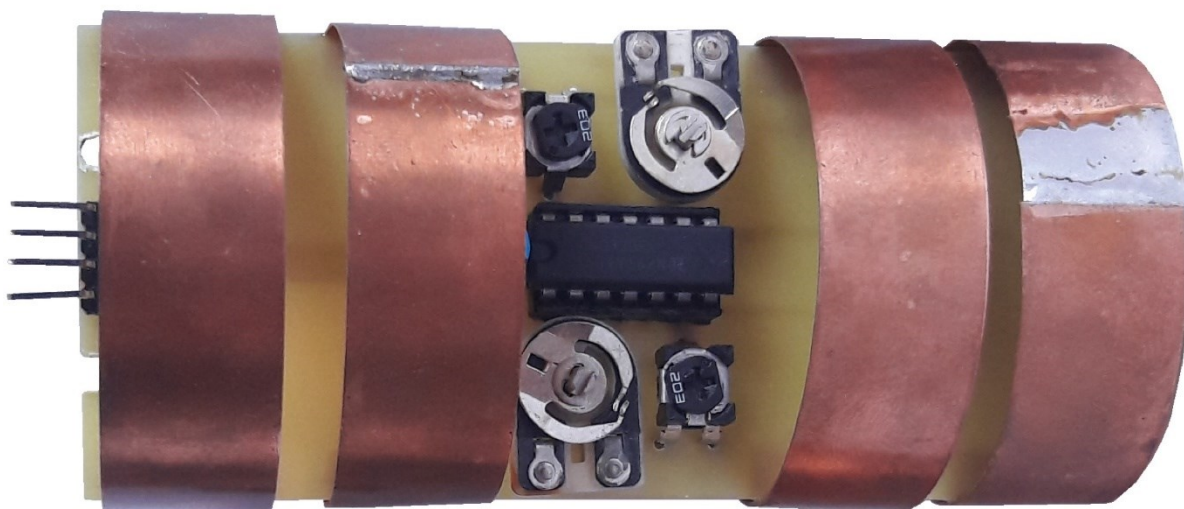
Chování tohoto senzoru již odpovídalo původním předpokladům, a proto bylo rozhodnuto toto zapojení dále vylepšovat a ladit ve snaze o vytvoření samostatně funkčního senzoru půdní vlhkosti, umístěného v plastové trubce o vnějším průměru 50 mm.

3.2.6 Zkušební verze 0.6

Senzor verze 0.6 schematicky vychází z předchozí verze, celé zapojení však bylo umístěno na desku plošných spojů, která již byla rozměrově přizpůsobená pro instalaci do zvolené plastové trubky – tedy šířka necelých 46 mm, délka byla zvolena na 100 mm. Délka byla zvolena s ohledem na rozměr elektrod a potřebné přítomné elektroniky. Současně je tím dána minimální vzdálenost senzorů v trubce, a tedy vertikální rozlišení měřicích bodů půdní vlhkosti v rámci půdních horizontů.

Vzhledem k dostupnému místu na DPS a současně dalších dvou volných hradlech v použitém integrovaném obvodu CD4093BE bylo přistoupeno k umístění dalších dvou elektrod na desku a zkopírování obvodu generátoru. Tím vznikl dvojitý senzor využívající pouze jediný integrovaný obvod, kterým je možné kromě samotné půdní vlhkosti měřit i vzájemnou závislost naměřených hodnot půdní vlhkosti při umístění více elektrod do jedné plastové trubky, tedy vzájemné ovlivňování senzorů.

V souladu s očekáváním přítomnost dalšího senzoru výrazně ovlivňuje naměřené hodnoty, což není žádoucí, neboť by v praxi nebylo možné již instalované sondy dále upravovat, a to jak přidáváním, tak i odebráním dalších senzorů. Toto ovlivnění je způsobeno galvanickým propojením elektrod jednotlivých senzorů. Vzhledem k použitému zapojení je jedna elektroda kondenzátoru přímo spojená s nulovým potenciálem obvodu. Při umístění druhého senzoru do stejné trubky tak v podstatě dojde ke zvětšení plochy jedné elektrody na dvojnásobek původní hodnoty, což s sebou současně přináší i zvýšení naměřené kapacity takto vzniklého kondenzátoru. Další verze senzorů tedy musí nevyhnutelně zajistit vzájemné galvanické oddělení jednotlivých senzorů, nebo alespoň jejich elektrod.

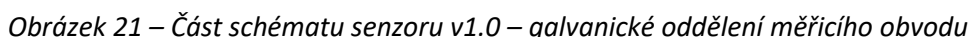


Obrázek 20 – Senzor verze 0.6

3.2.7 Verze 1.0

Senzor verze 1.0 již byl vyvíjen s myšlenkou vzájemného pospojování více senzorů za sebe. K tomu byly vybrány konektory rodiny D-Sub, konkrétně DE-9, které jsou známé ze stolních počítačů, kde plnily funkci konektoru sériového portu. Tyto 9pinové konektory mají nejen dobrou mechanickou pevnost a dostatečnou proudovou zatížitelnost (dle výrobce až 5 A), ale lze je navíc i šroubově spojit, takže je možné za sebe zapojit větší množství senzorů bez obav o jejich rozpojení v průběhu instalace nebo vytahování z trubky.

Šířka navrhovaného senzoru byla dána dle vnitřního průměru použité trubky, tedy necelých 46 mm, délka DPS byla zachována z předchozí verze, tedy 100 mm. Tímto byl jasně definován prostor pro veškerou elektroniku, kterou senzor ke své správné funkci potřebuje.



Současně se již jedná o plně soběstačný senzor, k měření frekvence tak již není využíván laboratorní měřák, ale mikrokontrolér umístěný přímo na desce senzoru. Konkrétně byl vybrán čip ATmega324PB, který disponuje nejen dostatečnou programovou a datovou pamětí, ale také řadou periférií – zejména kontrolérem I²C rozhraní (výrobce jej označuje jako TWI) nebo například A/D

převodníkem, používaným pro měření napájecího napětí. Rovněž je k dispozici řada úsporných režimů, které mohou přinést úsporu energie v případě neaktivity senzoru. [22]

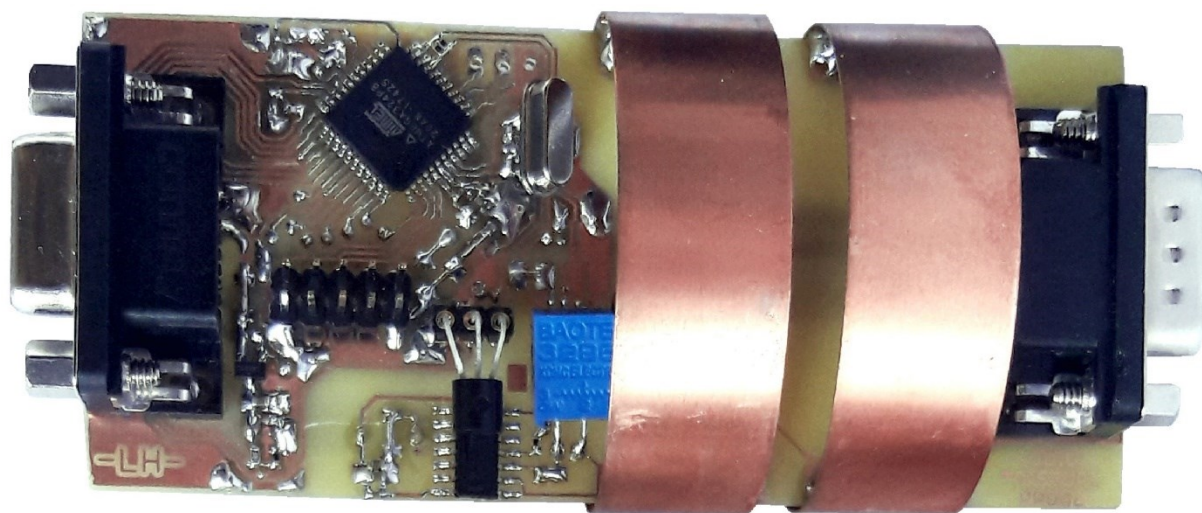
Časovou referenci mikrokontroléru tvoří externí krystal s nominální hodnotou 16 MHz. Použitý mikrokontrolér má zároveň za úkol přepočítat naměřenou hodnotu dle aktuální teploty, přičemž senzorem teploty je integrovaný obvod DS18B20. Ten byl zvolen nejen s ohledem na předchozí zkušenosti, ale i na dostatečnou přesnost, nízkou spotřebu a malé rozměry. Pouzdro teploměru je poté umístěno do těsné vzdálenosti pouzdra generátoru CD4093BM, jehož teplotní závislost má v použitém zapojení největší vliv.

Vzhledem ke snaze o co možná nejmenší spotřebu jsou jednotlivé obvodové části mikrokontrolérem zapínány pouze po nezbytně nutnou dobu. Jedná se pak zejména o DC/DC měnič, optočlen a integrovaný obvod externího teploměru DS18B20.

Naměřené hodnoty půdní vlhkosti jednotlivých senzorů jsou pomocí sběrnice I²C zasílány do centrální řídicí jednotky, která vystupuje jako *master*. Senzory byly navrženy tak, aby při pospojování nebylo potřeba ručně měnit jejich adresu. K tomu slouží adresovací piny konektoru, kterých je k dispozici celkem 5, takže je teoreticky možné k jedné řídicí jednotce současně připojit až 31 senzorů. V praxi je však počet nižší, jednak dochází vlivem rostoucí délky napájecích cest k úbytku napětí a druhým problémem je pouze omezená špičková proudová kapacita napájecího zdroje, neboť vlivem nabíjení kondenzátorů v připojených senzorech dochází při jejich zapnutí k proudové špičce a s tím spojenému špičkovému poklesu napětí v řídicí jednotce. Velikost této špičky se odvíjí od počtu připojených senzorů, maximální počet možných připojených senzorů verze 1.0 však nebyl vyzkoušen, neboť byl vytvořen pouze jediný exemplář této verze.

Vzhledem k velkému počtu změn ve schématu zapojení bylo k této verzi přístupováno jako k experimentální, a proto byl vyroben pouze jeden kus, návrhem uzpůsobený výrobě v amatérských podmínkách, metodou založenou na osvětlování negativního fotorezistu. Vzhledem k předchozím zkušenostem autora s výrobou DPS byla výrobní kvalita desky zcela postačující, nevýhodou je však praktická nemožnost umístění vodivých propojení obou vrstev (prokovy) pod součástkami, zejména pod použitým mikrokontrolérem. Výsledkem je tak ne zcela optimální rozložení součástek a s tím spojené vedení cest.

Pro zbylé pasivní součástky obvodu bylo zvoleno vždy co možná nejmenší dostupné pouzdro určené pro povrchovou montáž. Limitní velikostí je standardizované pouzdro 0402, neboť je součástky této velikosti ještě možno pájet ručně, což je v případě experimentálního zapojení, kde dochází k časté úpravě hodnot použitých součástek, zcela zásadní.



Obrázek 22 – Senzor verze 1.0

3.2.8 Verze 1.1

Další verze senzoru přináší pouze malé změny zapojení. Jednou z nich je zvýšení hodnoty kondenzátoru u izolačního DC/DC měniče, díky čemuž je jeho rozběh stabilnější. Rovněž došlo k výměně původně používaného optočlenu za funkčně obdobný, ale s menšími rozměry pouzdra. Současně došlo k výměně programovacího ISP konektoru z dvouřadé kolíkové lišty za rozměrově výrazně menší plošky, určené pro programovací kabel TC2030-MPC. Díky úspoře místa na desce tak již součástky nezasahují do prostoru elektrod, čímž je zmenšen vliv jejich rušení na měřicí obvod.

Vzhledem k poznatkům z předchozí verze bylo rozhodnuto o nastavení základní oscilační frekvence měřicího generátoru signálu o frekvenci závislé na půdní vlhkosti na 4 MHz, při umístění senzoru na vzduchu. Při tomto nastavení vykazoval použitý obvod nejvyšší citlivost a dynamický rozsah, s čím souvisí i vyšší rozlišení navrženého senzoru.

Deska senzoru verze 1.1 byla zároveň osazena vývody pro možné budoucí rozšíření. Umístěny jsou zejména v oblasti měřicího generátoru. Tyto otvory zároveň slouží jako testovací body, pomocí kterých je možné zkontrolovat funkčnost zapojení.

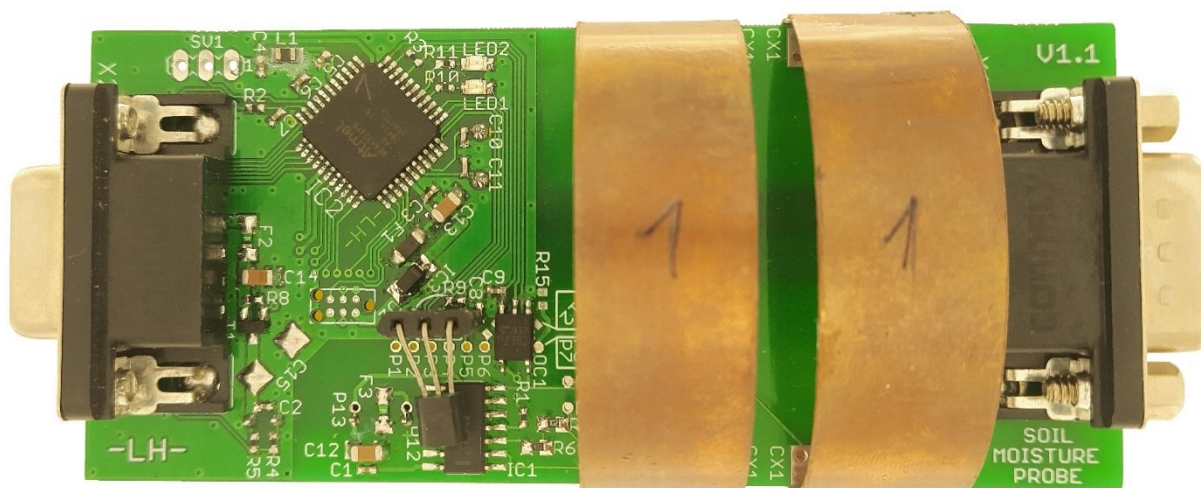
Pro účely zjednodušení vývoje firmwaru mikrokontroléru (který je totožný s předchozí verzí) bylo navržené zapojení doplněno o dvě barevné LED, červenou a zelenou. Jejich svit či blikání zobrazuje aktuální stav senzoru, zelená LED například signalizuje probíhající měření, a tedy zapnutí napájení DC/DC měniče a optočlenu. Červená LED bliká dle probíhající komunikace I²C sběrnice.

Zbýlé úpravy byly provedeny ve smyslu sériové výroby, navrženou desku již nelze amatérsky jednoduše vyrobit (prokovy pod součástkami), proto bylo přistoupeno k profesionální výrobě komerčním subjektem. Objednáno bylo 10 kusů desek plošných spojů, sestaveny byly celkem 4 kompletní kusy.

V rámci jednotlivých kusů byly vyzkoušeny různé izolační měniče. Ukázalo se, že se DC/DC měniče různých výrobců liší ve velikosti výstupního napětí při totožném vstupním napětí. Rozdíl se sice pohyboval v rozmezí přibližně $\pm 0,4$ V (což je v rámci tolerance udávané výrobcí), ale i tento rozdíl měl značný dopad na výstupní frekvenci měřicího generátoru. Pro budoucí zapojení tak jasně vyplývá, že musí být použit pouze jeden konkrétní typ.

Z dalších výrobcem udávaných parametrů je důležitý ještě jeden – kapacita izolačního přechodu uvnitř DC/DC měniče. Mezi jednotlivými součástkami různých výrobců existují značné rozdíly této

Pro toto zapojení je žádoucí, aby tato kapacita byla pokud možno co nejmenší, neboť je tato kapacita sériově řazena mezi jednotlivé kapacity senzorických kondenzátorů. Dle teorie je tedy potřeba udržet tuto vzájemnou kapacitu co nejmenší, neboť o to menší je posléze míra vzájemného ovlivňování senzorů umístěných v rámci jedné sondy.



Obrázek 23 – Senzor verze 1.1

V období od května do srpna roku 2020 proběhlo několik testování různých senzorových sestav přímo v terénu. I když senzor na změnu půdní vlhkosti reagoval dle očekávání, ukázalo se, že vlivem teplotního kolísání dochází k nepřesnostem měření. Typickým jevem bylo náhlé snížení nebo zvýšení naměřené půdní vlhkosti při západu nebo východu slunce, kdy docházelo k prudšímu ochlazení nebo zahřátí těla sondy vlivem slunečního záření. Následně, po ustálení, se pak naměřená hodnota půdní vlhkosti vrátila na hodnotu prakticky totožnou s měřením proběhlým v předchozím dni nebo noci. Tento problém nejspíše není jednoduše možné v této verzi senzoru odstranit, neboť teplota vzduchu v sondě, kterou měří teploměr teplotní kompenzace, není vždy totožná s teplotou senzoru jako takového, respektive přímo čipu generátoru. Jednou z možností je změna pouzdra teplotního senzoru a jeho umístění přímo na desku plošných spojů senzoru, nicméně zde je velké riziko ovlivňování skutečné teploty teplem generovaným jinými součástkami, zejména izolačním DC/DC měničem.

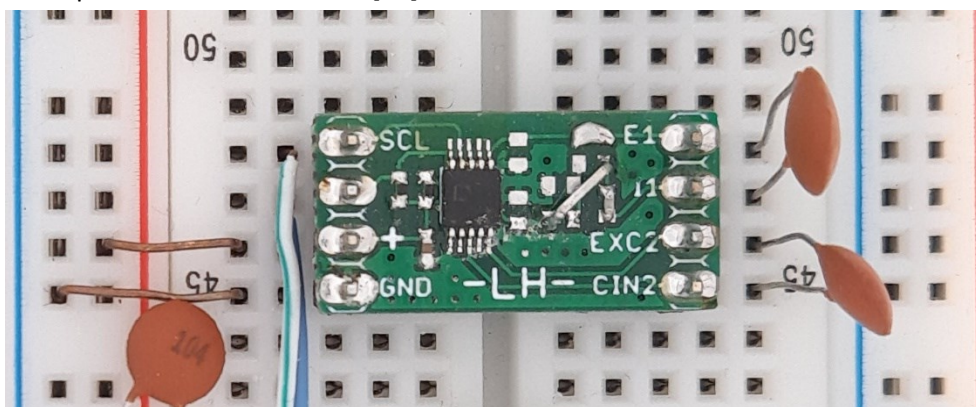
Dalším pokusem o alespoň částečnou odolnost vůči prudkým teplotním změnám těla sondy byly ve snaze o znesnadnění cirkulace vzduchu uvnitř sondy umístěny na konektory mezi jednotlivé senzory mechanické přepážky z plastu. Zlepšení se dostavilo pouze malé, nevýrazné, a tedy neprůkazné.

Konečným rozhodnutím pro vývoj další verze senzoru bylo vyvstání problému s přiléhavostí měděných kroužků měřicího kondenzátoru. Vzhledem k toleranci a teplotní roztažnosti plastového těla sondy bylo velmi obtížné zajistit dokonalý kontakt elektrod s vnitřní stěnou trubky. Navíc měděné kroužky tvořící elektrody byly vyráběny ručně, a proto nebyly dokonale stejné. Ve snaze o odstranění těchto nepřesností byla dle potřeby vnější strana kroužků oblepena vodivou hliníkovou páskou. Aby však bylo možné umísťovat senzory do trubky bez použití nepřiměřené síly, musí být mezi tělem sondy a elektrodami alespoň malá vzduchová mezera. Velikost této mezery má však zcela zásadní vliv

na naměřenou hodnotu, a i velmi malá změna, okolo desetiny milimetru, výrazně změní kapacitu měřicího kondenzátoru a tím i frekvenci generátoru. Ani dodatečné úpravy elektrod vodivou páskou nepřinesly kýžené výsledky, páska se často odlepovala, trhala a ulpívala na vnitřní stěně těla senzoru, čímž značně ztěžovala vytažení elektrody z trubky. Po opětovné aplikaci pásky na danou elektrodu bylo navíc pro zajištění přesnosti potřeba opakovat kalibraci, což přineslo neúměrnou časovou zátěž a zásadní překážku pro instalaci, pokud k poškození pásky došlo přímo při instalaci v terénu.

3.2.9 Verze 2.0

Senzor ve verzi 2.0 oproti svým předchůdcům přináší zásadní změnu zapojení – integrovaný převodník kapacity na digitální hodnotu, konkrétně typ AD7150. Ten byl vybrán pro svou cenovou přívětivost a zároveň slibné parametry, zejména velký rozsah měření (0-13 pF). Prevodník komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice I²C, přičemž na sběrnici vystupuje jako podřízené zařízení (běžně označován jako *slave*). K vyčítání hodnot z integrovaného převodníku byl použit totožný mikrokontrolér ATmega324PB jako u předchozí verze, stejně tak je zachováno i hlavní komunikační rozhraní s řídicí jednotkou (I²C) včetně dynamické adresace. Zachována byla dokonce i vzájemná kompatibilita s předchozí verzí senzorů. [21]



Obrázek 24 – Zkušební zapojení převodníku AD7150 v nepájivém poli

Vzhledem k experimentálnímu charakteru zapojení nebyla pro senzor vytvořena samostatná deska plošných spojů, jako tomu bylo u předchozích verzí. Zapojení bylo nejdříve testováno v kontaktním nepájivém poli, kde však docházelo k zásadnímu ovlivnění měření vlivem přítomných kapacit mezi kontakty nepájivého pole. Proto byl vytvořen adaptér na DPS senzoru verze 1.1 ve formě malé desky, pouze se zvoleným čipem integrovaného převodníku a nezbytnými podpůrnými součástkami. S takto vytvořeným senzorem byla poté vyzkoušena funkčnost a vlastnosti zapojení.

Senzor fungoval dle předpokladů, oproti předchozím verzím zvláště vyniknul teplotní stabilitou, neboť použitý čip obsahuje integrovanou teplotní kompenzaci. Zklamáním vůči původním předpokladům však bylo rozlišení naměřené hodnoty půdní vlhkosti. Prevodník kapacity na digitální hodnotu vykazoval značný šum, kterýmž byla výsledná hodnota významně poznamenána. Částečné zlepšení přineslo provedení více měření a jejich následné statistické vyhodnocení, ani to však nebylo schopno zajistit více jak osmibitového rozlišení převodníku – výrobcem udávaný rozsah je 12 bitů. [21]

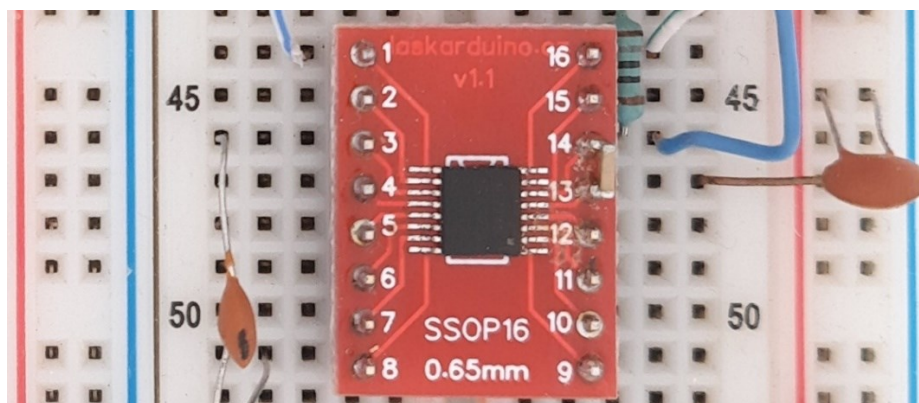
Vzhledem k nízkému rozlišení bylo od dalšího vývoje této verze senzoru upuštěno. Pro další vývoj se ale ukázalo, že použití integrovaných převodníků může téměř zcela odstranit problém teplotní závislosti senzoru – nevýhodou je ale značně vyšší cena takových obvodů.

3.2.10 Verze 2.1

Nová verze opět přináší změnu modelu integrovaného převodníku kapacity na digitální hodnotu, tato verze je založena na čipu AD7745, který oproti předchozí verzi slibuje podstatně vyšší rozlišení (24 oproti 12 bitům). Výrobce udávané efektivní rozlišení má dosahovat až 21 bitů, současně při zachování vysoké linearity ($\pm 0,01\%$) a továrně kalibrované přesnosti měřené kapacity ± 4 fF. Měřicí rozsah je ± 4 pF, přičemž integrovaný obvod je schopen interně kompenzovat základní kapacitu elektrod až do výše 17 pF. Samozřejmostí je integrovaná teplotní kompenzace s rozlišením až $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnotu teploty lze programově vyčíst, zvolený čip je tak možné použít i jako teploměr s přesností $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Další výhodou je široký rozsah napájecího napětí, od 2,7 V do 5,25 V, naměřená hodnota přitom není na velikosti napájecího napětí nikterak výrazně závislá, použití stabilizátoru napětí tak není nezbytné. Příjemnou změnou vůči měřicí části senzoru verze 1.1 je nižší spotřeba, konkrétně 0,7 mA. [20][21]

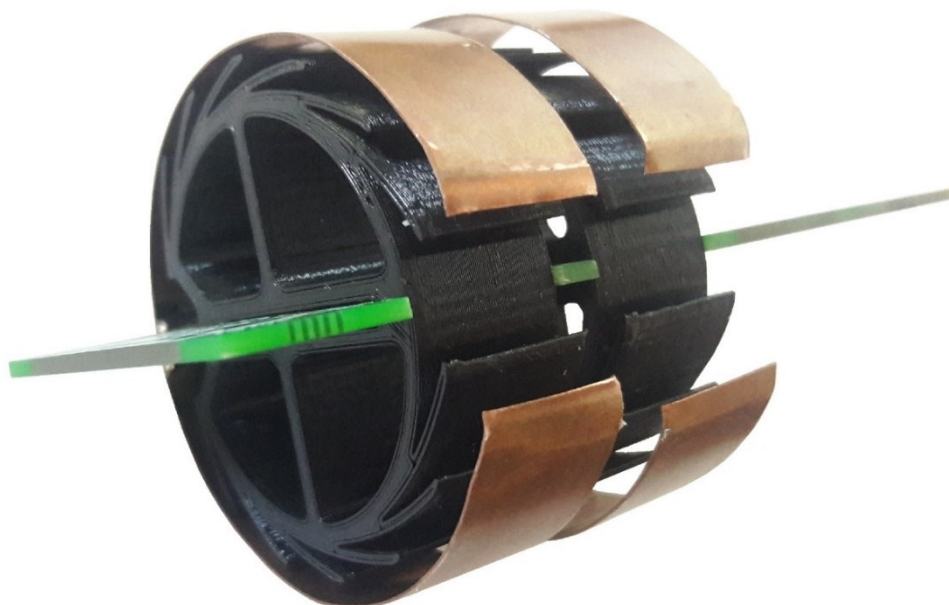
Komunikace s okolím pak probíhá, obdobně jako u integrovaného převodníku předchozí verze, pomocí sběrnice I²C. Použitý mikrokontrolér je totožný s předchozími verzemi, konkrétně tedy ATmega324PB. Změnou je však způsob taktování, dříve používaný externí krystal již není potřeba a mikrokontrolér tedy může pracovat dle rychlosti interního oscilátoru. Pro účely senzoru byla zvoleno základní taktování frekvencí 1 MHz, neboť tato frekvence přináší vhodný kompromis mezi spotřebou mikrokontroléru a potřebnou rychlostí vykonávání instrukcí.

Před začátkem návrhu desky plošných spojů bylo rozhodnuto o vyzkoušení funkce a zjištění případných problémů zapojení, proto bylo přistoupeno ke zkoušce zapojení prostřednictvím nepájivého pole. Vzhledem ke zkušenostem s převodníky kapacity na digitální hodnotu z předchozí verze senzoru proběhl vývoj zapojení této verze velmi rychle a mohlo tak být přistoupeno k návrhu DPS.



Obrázek 25 – Zkušební zapojení převodníku AD7745 v nepájivém poli

Verze 2.1 přináší kromě změny modelu integrovaného převodníku kapacity na digitální hodnotu jednu zásadní změnu. Tou je koncept nových, ohebných elektrod, které jsou schopny přizpůsobit se drobným rozdílům vnitřního průměru různých trubek, včetně změny rozměrů v rámci teplotní roztažnosti plastového těla sondy. Nová konstrukce elektrod již navíc ke své správné funkčnosti nepotřebuje dosažení přesného tvaru kruhu o přesném průměru, čímž se výroba senzorů značně zjednodušuje a zrychluje. Nově používané elektrody jsou sice tvořeny stejným materiálem jako u předchozích verzí senzoru – měděným páskem o šířce 15 mm, ten je však pouze stříhán na délku 140 mm a posléze ohnut do tvaru písmene C. Pásek sám o sobě není příliš pružný a snadno se deformuje, proto byly pod elektrody umístěny plastové výztuhy, sloužící zároveň jako pružiny zajišťující dokonalý kontakt elektrod s vnitřní stěnou trubky.



Obrázek 26 – Nový koncept pružných elektrod senzoru verze 2.1

Pružiny samy o sobě ale zabraňují deformaci měděných pásků pouze směrem ke středu, při zasouvání senzorů vybavených pouze těmito výztuhami docházelo k boční deformaci elektrod, nežádoucí končící jejich vzájemným zkratem. Proto byly výztuhy doplněny plastovými oddělovači, které jsou po obvodu rovněž tvořeny pružnou částí a zabraňují tak nežádoucímu pohybu elektrod i v lehce deformovaných trubkách nebo trubkách s mírně odlišným vnitřním průměrem.

Vzhledem k provedeným změnám bylo potřeba vytvořit novou desku plošných spojů, která kromě nového zapojení obsahuje i otvory a zářezy pro umístění plastových výztuh a pružin. Oproti předchozím verzím rovněž došlo k jejímu mírnému zkrácení na cca 91 mm, neboť zbylá vzdálenost do 100 mm je tvořena přesahem konektorů. Na první pohled patrnou zvláštností je poté absence izolačního DC/DC měniče. K jeho vynechání došlo vzhledem k plovoucímu zapojení elektrod, kdy ani jedna měřicí elektroda není přímo spojena s nulovým potenciálem. Výrobce navíc uvádí, že vnitřní obvody integrovaného převodníku kapacity na digitální hodnotu bez problémů tolerují kapacitu až 60 pF mezi nulovým potenciálem a elektrodami samotnými, a i při vyšší této kapacitě je výsledná naměřená hodnota zatížená pouze malou chybou. Vynechání DC/DC měniče mimo jiné zásadně zjednodušuje zapojení, současně přináší podstatnou úsporu energie a v neposlední řadě snižuje náklady na konstrukci senzoru. [20]

Zkonstruovány byly celkem 3 kusy senzorů ve verzi 2.1. Při testování v září a říjnu roku 2020 bylo zjištěno, že naměřené hodnoty půdní vlhkosti neodpovídají předpokládaným hodnotám. Senzory byly kalibrovány samostatně, při jejich vzájemném spojení a instalaci v rámci jedné sondy však okamžitě vykazovaly jiné hodnoty než při samostatném umístění. Postupným systematickým hledáním bylo zjištěno, že senzory nečekaně, a proti všem předpokladům, vykazují jiné hodnoty půdní vlhkosti v závislosti na ploše vodivé vrstvy nulového potenciálu na desce plošných spojů (polygon s označením GND). Zpětně bylo zjištěno, že prováděná kalibrace byla provedena chybně, neboť pouhý dotek desky plošných spojů nebo kovových částí konektorů osobou provádějící kalibraci způsobí nepředvídatelnou změnu chování měřicího převodníku kapacity. Ukázalo se tak, že původní přítomnost izolačního DC/DC měniče zajišťujícího galvanické oddělení sensorické části od zbytku obvodu senzoru mělo své opodstatnění.

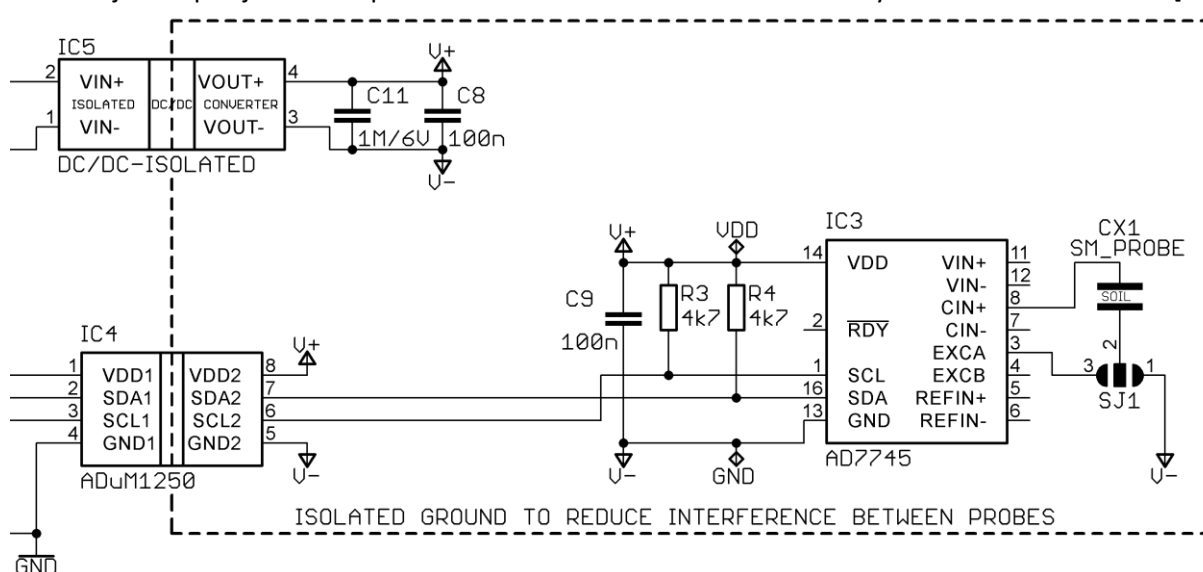
3.2.11 Verze 2.2

Tato verze měla za cíl vyřešit všechny problémy předchozích verzí ve snaze o vytvoření skutečně spolehlivě funkčního senzoru půdní vlhkosti. Plastové pružinové výztuhy a oddělovače používané pro správnou funkci a držení tvaru měřicích elektrod prošly dalším vývojem. Nové výztuhy oproti předchozí verzi snižují tření mezi senzorem a trubicou, čímž zjednodušují zasouvání senzorů, zejména při jejich větším počtu v rámci jedné sondy.

Princip měření, stejně jako použitý integrovaný obvod odpovídají předchozí verzi 2.1. Rozdílem je rozložení cest na desce plošných spojů, verze 2.2 navíc přidává možnost dvojího zapojení jedné elektrody – buďto spojením s nulovým potenciálem (galvanicky odděleným od zbytku sondy) nebo spojením s budícím pinem převodníku kapacity na digitální hodnotu. K tomuto kroku bylo přistoupeno po momentálním nedostatku integrovaných obvodů AD7745 na trhu. Navržená deska tak umožňuje záměnu za čipy AD7746 (obsahuje dva měřicí kanály) nebo AD7747 (jedna elektroda spojena s nulovým potenciálem).

Oproti předchozí verzi senzoru byl přidán izolační DC/DC měnič. Experimentálně bylo zjištěno, že je možné použít fyzicky menší měniče (pouzdro SIP4 oproti původnímu SIP7). Menší měnič, konkrétně TBA 1-0510 pak oproti původně používanému TBA 1-0511HI sice vykazuje vyšší kapacitu izolačního přechodu, nicméně ke změně naměřené hodnoty půdní vlhkosti oproti původně používanému většímu měniči při testování nedocházelo.[17][23]

Novou výzvou bylo zajištění obousměrné komunikace pomocí sběrnice I²C mezi galvanicky oddělenými zařízeními. Původně zamýšlené řešení využívající vysokorychlostní optočleny bylo opuštěno nejen z hlediska značných fyzických rozměrů těchto součástek, ale i s ohledem na jejich spotřebu. Naštěstí jsou k dispozici kompaktní integrované datové převodníky, které jsou přímo určené pro galvanické oddělení sběrnice I²C. V zapojení byl využit čip ADuM1250, který podporuje jak 3V, tak i 5V napěťové logické úrovně, přičemž jednotlivé, vzájemně izolované části mohou současně využívat odlišné napěťové úrovně. Převodník navíc pro svou funkci nepotřebuje žádné podpurné součástky – výjimku tvoří pouze doporučené 100nF kondenzátory pro obě galvanicky oddělené části. Samozřejmostí pak je nutnost použití externích rezistorů v obou oddělených částech I²C sběrnice. [24]



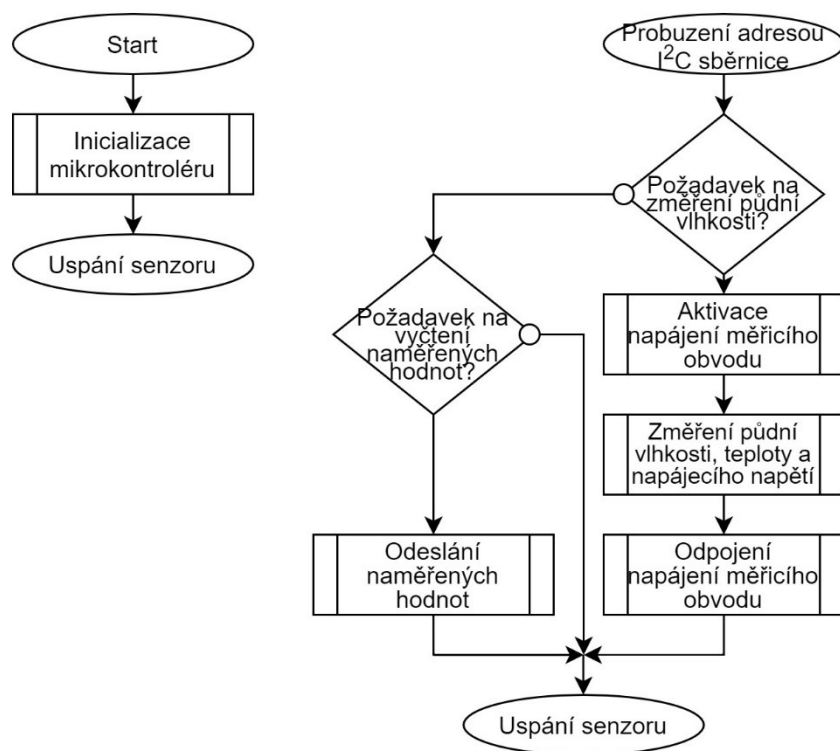
Obrázek 27 – Schéma zapojení měřicí části senzoru verze 2.2

Použitý mikrokontrolér je totožný s předchozími verzemi, stejně tak i způsob a frekvence taktování – tedy interní oscilátor s frekvencí 1 MHz. Zachována opět byla i zpětná kompatibilita komunikačního programového vybavení napříč senzory. Na jedné sběrnici, tedy v rámci jedné sondy je tak teoreticky možné použít současně jak senzory verze 1.1, verze 2.0, tak i konstrukcí a zapojením odlišné senzory verze 2.1 a 2.2. Jedná se však spíše o zajímavost, v praxi taková konfigurace sondy postrádá smysl.

Algoritmus programu senzoru je v zásadě jednoduchý a sestává pouze z několika málo bloků. S ohledem na co možná nejnížší spotřebu jsou senzory většinu času bez napájení, které je řídicí jednotkou zapnuto až v případě potřeby provedení měření. Ihned po zapnutí senzoru se provede nezbytná inicializace mikrokontroléru, který následně ihned přejde do režimu hlubokého spánku s vypnutým oscilátorem.

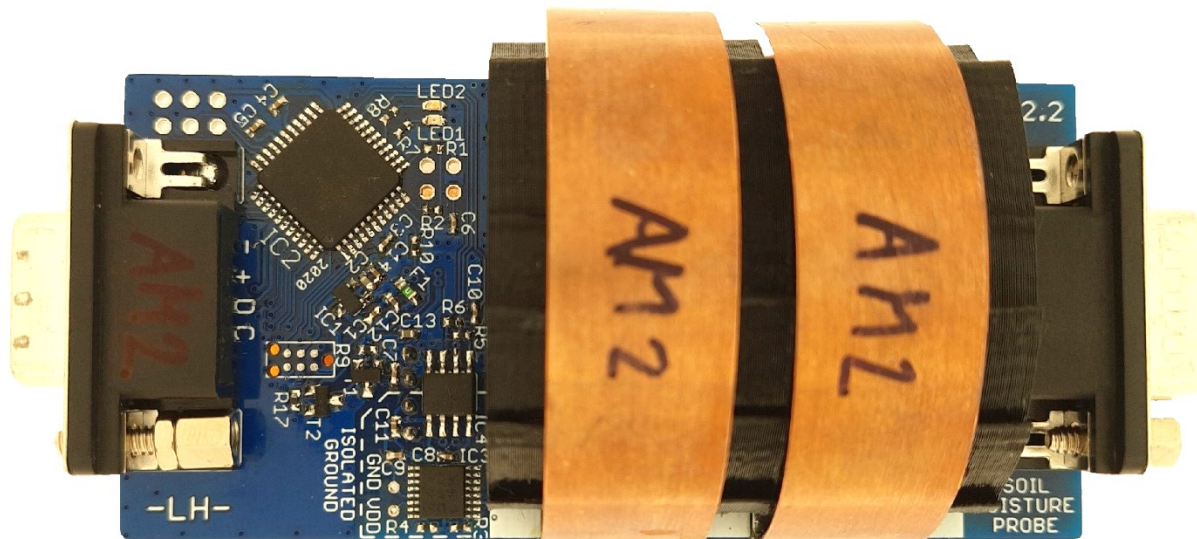
V této fázi mikrokontrolér pomocí interní periferie sleduje sběrnici I²C a čeká na přijetí datového paketu začínajícího vlastní adresou, ostatní datové přenosy ignoruje a zůstává v režimu spánku. Jakmile je přijatá adresa totožná s adresou uloženou v paměti EEPROM, dojde k probuzení mikrokontroléru a dekodování požadovaného příkazu. V případě požadavku na provedení měření dojde k zapnutí napájení pro měřicí obvod. Dále již následuje vlastní měření, kdy je čekáno na dokončení měření půdní vlhkosti a teploty samotného převodníku AD7745. Posledním krokem je změření velikosti napájecího napětí měřicí části, po vyčtení naměřených hodnot je ihned odpojeno napájení nepotřebných částí senzoru a mikrokontrolér je opět hluboce uspán, přičemž opět čeká na probuzení detekováním vlastní adresy na sběrnici.

V případě příjmu požadavku na vyčtení naměřených dat jsou data ihned řídicí jednotce odeslána a jakmile je komunikace ukončena, mikrokontrolér opět přejde do režimu spánku, přičemž řídicí jednotka zpravidla po dokončení měření a vyčtení dat ze všech senzorů odpojí senzory od napájení, čímž dojde k jejich vypnutí.



Obrázek 28 – Zjednodušený algoritmus programu senzoru verze 2.2

Celkem bylo zkonstruováno 10 kusů senzorů ve verzi 2.2. Ověření funkce proběhlo zejména v rámci druhé testovací etapy na jaře roku 2021.



3.2.12 Distanční vložka

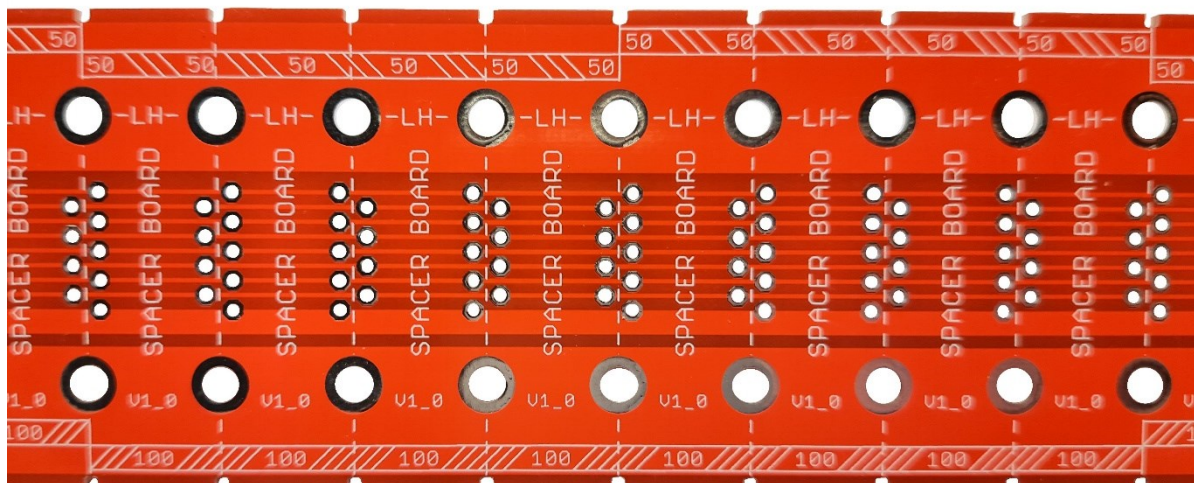
Jelikož jsou senzory navrženy v délce 10 cm, není možné pouze pomocí senzorů dosáhnout různých měřících hloubek, které nejsou celočíselnými násobky této délky. Rovněž je neekonomické využívat plnohodnotné senzory jako pouhou výplň k dosažení potřebné hloubky. Proto bylo přistoupeno k vytvoření samostatné distanční vložky, která kromě vzájemně propojených konektorů neobsahuje žádné další součástky a nezvyšuje tak zbytečně cenu.

Deska byla navržena pro různé distanční vzdálenosti a je možno ji zkracovat dle potřeby, krok nastavené vzdálenosti je 2,5 cm. Zbylou část lze dále využít, neboť deska obsahuje střídavě umístěné oba typy konektorů. Distanční vložka byla navržena v délce 50 cm, pokud je potřeba dosáhnout větší vzdálenosti, stačí vzájemně spojit více kusů.



Obrázek 30 – Distanční vložka délky 50 cm

Na zadní straně byly vytvořeny jednoduchá pravítka, podle kterých je možno distanční vložku jednoduše zkracovat. Vzhledem k zajištění přehlednosti a čitelnosti byly zaneseny značky pouze každých 50 a 100 mm, neboť toto jsou nejčastější používané délky, případně jejich násobky.

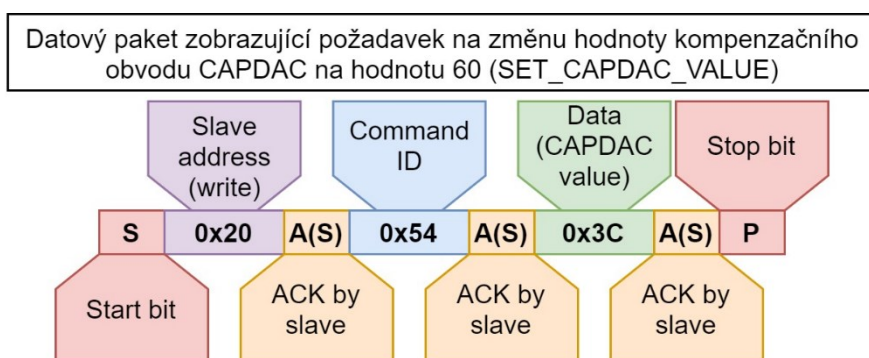


Obrázek 31 – Detail zadní strany distanční vložky, zdroj: autor

3.3 Komunikační protokol senzoru

Pro komunikaci se senzorem byl použit protokol, který je hojně využíván napříč různými I²C zařízeními. Ten je určen pro *single master – multi slave* verzi sběrnice I²C, tedy pro případ, kdy sběrnici vždy ovládá pouze jedno a totéž zařízení, přičemž ostatní zařízení pouze odpovídají. *Master* zařízení je v tomto případě řídicí jednotka, senzory samotné vždy vystupují pouze jako *slave* – každý senzor pak disponuje vlastní adresou, pod kterou na sběrnici vystupuje. Vzhledem k rozšířenosti použitého komunikačního protokolu je možné na jednu sběrnici kromě půdních senzorů připojit i jiná zařízení, v rámci této práce toho však nebylo využito.

Detail komunikačního protokolu je na obrázku 32. Znázorněný příklad ukazuje nastavení hodnoty (hodnota 60 odpovídá hexadecimální hodnotě 0x3C) kompenzace měřícího obvodu senzoru (CAPDAC) příkazem SET_CAPDAC_VALUE s hexadecimální hodnotou 0x54. Zahájení komunikace je vždy provedeno vysláním start bitu *master* zařízením. Následuje adresa senzoru, nejnižší bit přitom indikuje požadavek na zápis (logická 0) nebo čtení (logická 1). *Slave* zařízení následně potvrdí přítomnost na sběrnici (*acknowledge*). Dále následuje identifikační hodnota příkazu, která je senzorem opět potvrzena. Další bajt přenáší samotná požadovaná data směrem do senzoru, zde novou hodnotu CAPDAC registru. Senzor opět příjem potvrdí, načež řídicí jednotka vyšle bit signalizující ukončení komunikace.



Obrázek 32 – Znázornění průběhu komunikace sběrnice I²C, příkaz SET_CAPDAC_VALUE

Další příklad zobrazuje průběh komunikace v případě příkazu GET_TEMP, který ze senzoru vyčte aktuálně naměřenou teplotu. Začátek komunikace je obdobný jako v předchozím případě, po odeslání příkazu však místo odeslání dat řídící jednotka na sběrnici vygeneruje stav opakovaného startu, přičemž následně odešle adresu senzoru s nastaveným nejnižším bitem do logické jedničky – je tedy signalizován záměr o vyčtení dat ze senzoru. Ten tento záměr nejprve potvrdí a následně odešle první bajt, který odpovídá vyšším osmi bitům výsledné 16bitové hodnoty. Master příjem dat potvrdí, čímž dá slave zařízení prostor k odeslání druhého, nižšího bajtu dat. Záměr o ukončení vyčítání dat ze senzoru řídící jednotka signalizuje nepotvrzením příjmu, které je doprovázeno ukončovacím bitem.

Přijatá data jsou složena v jedno 16bitové znaménkové číslo (dvojkový doplněk). Pro získání skutečné teploty ve stupních Celsia je potřeba hodnotu vydělit číslem 100. Rozlišení tepoty je tedy na setiny stupňů Celsia, přesnost naměřené hodnoty je ale řádově vyšší a je dána použitým teploměrem konkrétní verze senzoru. Příklad zobrazuje přenos hexadecimální hodnoty 0x0802, což odpovídá teplotě 20,5 °C.



Obrázek 33 – Znáznornění průběhu komunikace sběrnice I2C, příkaz GET_TEMP

Pro úplnost jsou všechny dostupné příkazy pro senzory verze 2.2 uvedeny, včetně popisu, přehledně v tabulce v příloze Příloha č. 3.

3.4 Kalibrace senzoru

Jelikož je každý senzor vyroben s drobnými odchylkami, je potřeba provést následnou kalibraci sestaveného senzoru. Provedení kalibrace je možné provést více způsoby, z důvodu nízké časové stálosti vlhkosti ale není vhodné používat přímo vzorek půdy. Proto byla k provedení kalibračního měření zvolena dvoubodová metoda, přičemž jedno měření je provedeno ve vzduchu a druhé při ponoření senzoru do vody. Tímto je zjištěn maximální rozsah senzoru a dle dříve změřené charakteristiky je následně vytvořena funkce pro přepočtení naměřené hodnoty kapacity na hodnotu půdní vlhkosti. Vzhledem k problémům a počtu sestavených kusů senzorů různých verzí byla kalibrace provedena pouze pro verze 1.1 a 2.2.

3.4.1 Kalibrace senzorů verze 1.1

Při kalibraci starší verze senzorů (v1.1) nebylo potřeba provádět jakékoli nastavení měřicího obvodu, zjednodušeně řečeno obvod měřil ihned po sestavení senzoru. Kalibrace tak sestávala pouze ze zjištění minima a maxima naměřených hodnot, tedy zjištění měřicího rozsahu provedením kalibračních měření při umístění senzoru na vzduchu a po ponoření do vody.

Po zjištění rozsahu již byly další naměřené hodnoty mikrokontrolérem senzoru interně, dle předem zjištěné charakteristiky, převedeny na skutečnou hodnotu půdní vlhkosti. Kalibrační

metoda sice fungovala relativně spolehlivě, nicméně vzhledem k příliš velkým rozdílům v oscilační frekvenci měřicích obvodů docházelo k velké nekonzistenci měřicích rozsahů napříč senzory. Příkladem mohou dva současně sestavené senzory, kdy jeden disponoval rozlišením 0,025 %, zatímco druhý pouze 0,1 % vlhkosti půdy. Druhým, zcela zásadním problémem kalibrace byl nedokonalý kontakt měřicích elektrod se stěnou trubky sondy, naměřená hodnota tedy mimo jiné záležela i na drobném naklonění senzoru v trubce, což znemožňovalo praktické využití senzorů mimo pečlivě sestavené a dobře kontrolované zkušební sondy.

3.4.2 Kalibrace senzorů verze 2.2

Samotná kalibrace senzorů nové verze vychází z kalibrace předchozí verze. Základem je opět zjištění měřicího rozsahu provedením měření při umístění senzoru volně ve vzduchu a posléze při ponoření do vody. Rozdílem je ale potřeba nastavení kompenzační hodnoty měřicího obvodu, který je označen jako CAPDAC. Jedná se o hodnotu určující zápornou kapacitu virtuálně připojeného kondenzátoru uvnitř integrovaného obvodu. Účelem je odečtení základní kapacity senzoru, kterou je možno zjistit právě při umístění senzoru volně ve vzduchu.

Vzhledem k silně nelineárnímu průběhu měřené kapacity v závislosti na skutečné vlhkosti půdy je ale senzor při umístění na vzduchu velmi citlivý a provedení nastavení hodnoty virtuálního kompenzačního kondenzátoru tak nelze provést přesně. Proto bylo přistoupeno k nastavení CAPDAC až při ponoření senzoru do vody, postupnou změnou hodnoty je posléze docíleno nastavení naměřené hodnoty kapacity až na samé hraně 16bitové rozsahu (hodnota 65 535 odpovídá kapacitě 4 pF). Vzhledem k drobným odchylkám při výrobě a konstrukci jednotlivých senzorů je možné, že některý ze senzorů vykáže větší změnu kapacity elektrod, než je praktický rozsah měřicího obvodu (4 pF). I proto je tento způsob kalibrace je vhodnější, neboť v praxi není možné tímto senzorem naměřit nižší hodnotu vlhkosti půdy než cca 10 %, zatímco hodnoty 100 % dosáhnout lze (například při zaplavení měřené lokality).

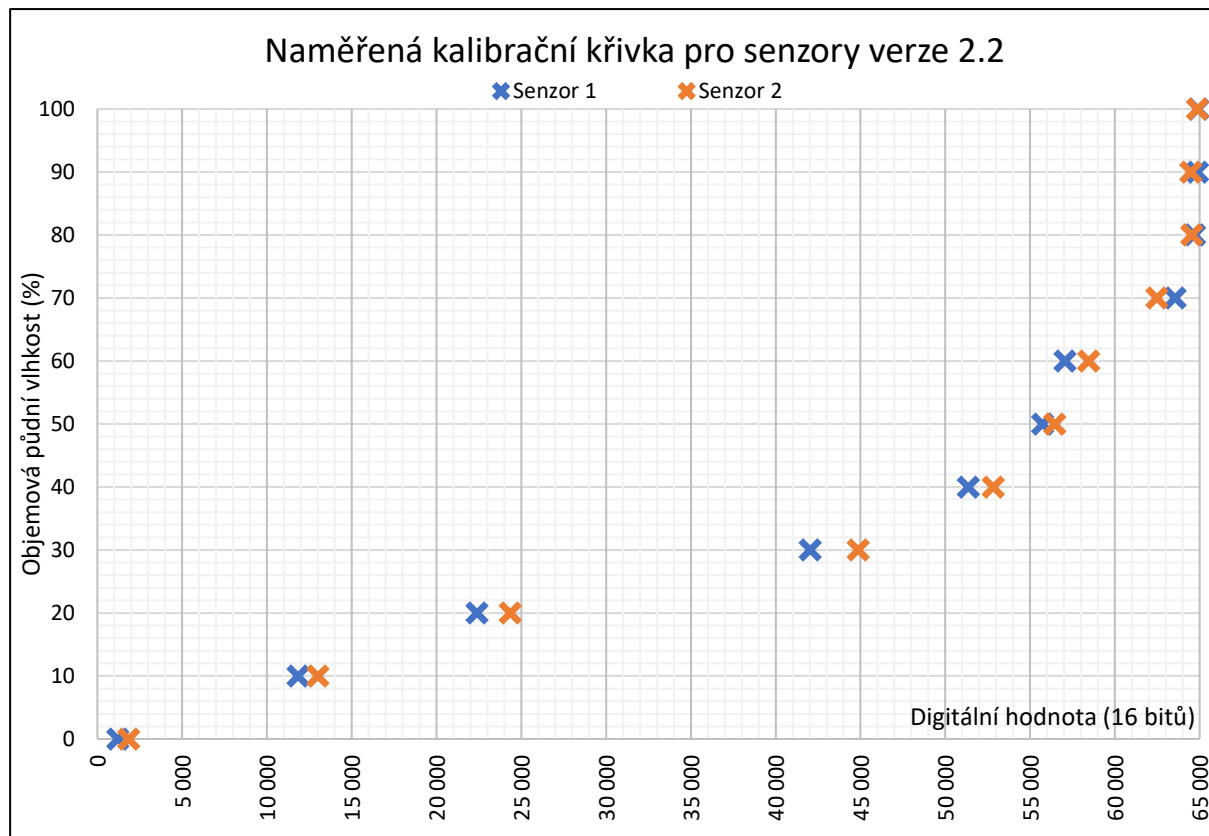
3.4.3 Převodní charakteristika kapacity na půdní vlhkosti

Jelikož je pomocí měřicího obvodu možné zjistit pouze naměřenou kapacitu (případně pouze surovou hodnotu naměřené frekvence měřicího oscilátoru), je pro potřeby dalšího využití naměřených hodnot nutné danou veličinu převést na hodnotu půdní vlhkosti. Proto byla změřena převodní charakteristika, která vznikla měřením uměle vytvořených kalibračních vzorků půdy.

Základem kalibračního vzorku je absolutně vysušená půda, do které je postupně přidáváno předem známé množství vody, půda je přitom vždy důkladně promíchána tak, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu rozložení vlhkosti napříč vzorkem půdy. Prvotní měření probíhalo ve vzorku vysušené půdy, tedy bez přidání vody. Tato hodnota se posléze stala základem měření, neboť v rámci dalších kalibračních vzorků půdy o objemu 10 l byl postupně přidáván 1 l vody. Postupně tak byly s krokem 10 % vytvořeny vzorky vykazující 0 až 100 % objemové vlhkosti půdy. Do každého vzorku byl umístěn senzor, který změřil surovou hodnotu kapacity. Tato hodnota byla následně zapsána do tabulky, která sloužila jako zdroj dat pro vytvořený převodní graf a samotnou převodní funkci.

Naměřená kalibrační křivka pro dva senzory verze 2.2 potvrdila dříve pozorovanou silnou nelinearitu naměřené digitální hodnoty vůči reálné půdní vlhkosti. Každý ze senzorů přitom naměřil poměrně dosti odlišné hodnoty v rámci většiny kalibračních půdních vzorů. Tato skutečnost vytvoření jednotné kalibrační křivky značně ztěžuje, a proto nebyla kalibrace u následného testování využita.

Pro reálné využití sond půdní vlhkosti v praxi je provedení kalibrace poměrně důležité, a proto bude v rámci dalšího vývoje provedena znova. Podmínky měření však budou více hlídány tak, aby byl vliv okolí co možná nejvíce omezen, současně bude kladen větší důraz na kvalitu jednotlivých vzorků půdy. Naměřené hodnoty rovněž odpovídají pouze půdě typu hnědozem, pro jílovité nebo písčité půdy je nutné provést kalibraci zvlášť.



Obrázek 34 – Naměřená převodní kalibrační křivka pro senzory verze 2.2

Alternativou provedené kalibrace formou zvyšování půdní vlhkosti je postupné vysušování půdního vzorku s pravidelným přesným měřením hmotnosti. Naměřené kalibrační hodnoty tak nebudou vztaženy k objemové, ale k hmotnostní půdní vlhkosti. Tato metoda však nebyla použita, neboť vyžaduje kvalitní laboratorní zařízení. Současně je tento způsob kalibrace velmi zdoluhavý, neboť je vždy potřeba vyčkat na vychladnutí půdního vzorku (vysoušení se provádí při 105 °C).

4 Návrh a realizace bezdrátového přenosu měřených dat s využitím technologie LoRa

V otázce sběru dat je samozřejmě potřeba řešit přenos dat do centrálního úložiště, kde mohou být naměřené hodnoty vyhodnoceny a dále využity. Způsobů, jak data ze samotného senzoru přenést do požadované databáze existuje nepřeberné množství, před začátkem návrhu zařízení zprostředkovávajícího přenos dat je potřeba nalézt vhodnou technologii.

4.1 Výběr vhodné technologie přenosu dat

Dostupné technologie je v zásadě možné rozdělit do dvou kategorií: na drátové (včetně optických vláken) a bezdrátové přenosy dat.

Vzhledem k předpokládanému využití navrhovaných půdních sond, tedy na polích a v sadech, bylo rozhodnuto o využití bezdrátové komunikace. Jak vyplývá z názvu, mezi jednotlivými sondami a centrálním komunikačním bodem není potřeba instalovat kabeláž, což by v mnoha případech ani nebylo možné, nehledě na zásadní navýšení ceny, složitosti a neúměrnému prodloužení doby instalace takovýchto senzorů.

4.1.1 Požadavky na zvolenou technologii

Bezdrátové technologie přenosu dat je možno dělit dle různých kategorií, přičemž každá z nich přináší své vlastní výhody a nevýhody. V případě půdních sond jsou však požadavky na komunikační rozhraní poměrně striktní. Základním požadavkem je dosah zvolené komunikační technologie. Předpokladem je umístění sond půdní vlhkosti na relativně velké ploše, běžně desítek až stovek hektarů. Zvolená komunikační technologie tedy musí být schopná spolehlivě fungovat na vzdálenost stovek metrů, v lepším případě jednotek kilometrů.

Dalším požadavkem je energetická nenáročnost zvolené komunikace. Vzhledem k předpokládanému bateriovému (akumulátorovému) zdroji energie půdních sond a dlouhého intervalu mezi jednotlivými přenosy (desítky minut, jednotky hodin) je vhodné využívat komunikační rozhraní pouze v momentě odesílání dat, bez potřeby neustálého připojení.

U půdních sond je předpokladem odesílání pouze malého množství dat, řádově desítek, případně maximálně nízkých stovek bajtů, není proto potřeba řešit žádné vysokorychlostní komunikační rozhraní.

Vzhledem k charakteru zařízení a nízkému objemu přenášených dat se předpokládá použití méně výpočetně výkonné elektroniky, proto je potřeba zvolit takovou bezdrátovou technologii, která nepotřebuje vysoký výpočetní výkon a současně je ideálně je i nenáročná na implementaci.

Z výše uvedených požadavků a předpokládaných parametrů vyplývá, že navrhovaná sond půdní spadá do kategorie zařízení internetu věcí. Proto je vhodné využít dostupné sítě používané právě v tomto segmentu, běžně se takový typ sítě označuje jako LPWAN. V zásadě jsou k dispozici tři vyhovující bezdrátové sítě – Sigfox, LoRa a NB – IoT. Další sítě zmíněné kategorie (například ZigBee nebo IQRf) nemají potřebný dosah, byť by mohlo být využito smíšené topologie, anglicky označované jako *mesh*. Problémem však může být vzdálenost brány (*gateway*) této technologie, která musí být v dosahu alespoň jednoho zařízení dané topologie. To přináší značné nevýhody takového řešení, a proto od něj bylo upuštěno. [5]

4.1.2 Sigfox

V České republice je síť Sigfox provozována operátorem SimpleCell, který zajišťuje její budování a správu. Pokrytí zajišťuje pomocí vlastních základnových stanic. Jelikož tento operátor spravuje síť i v jiných evropských státech je možné používat daná zařízení po celé Evropě, bez potřeby další registrace u jiných poskytovatelů.

Síť Sigfox využívá hvězdicovou topologii, centrálním bodem je přístupová stanice. Zařízení samotná mezi sebou nedokážou komunikovat, vždy potřebují přítomnost centrální BTS. Z hlediska koncového uživatele není možno provozovat vlastní přístupovou stanici a vytvořit si tak soukromou síť Sigfox.

Délka uživatelské zprávy je volitelná, maximálně však 12 bajtů. Za jeden den je možné poslat maximálně 140 zpráv. V Evropě komunikace probíhá v pásmu ISM, konkrétně 868 MHz, ze zákona tak může zařízení vysílat pouze po dobu 1 % času za hodinu, tedy celkem 36 sekund. Bilance rádiového spoje je udávána o hodnotě 157 dB. Udávaná přenosová rychlost je 100 bitů za sekundu při odesílání dat ze senzoru (*uplink*), respektive 600 bitů za sekundu směrem ze serveru do zařízení (*downlink*). [25]

4.1.3 NB – IoT

Provoz sítě NB – IoT v České republice zajišťuje operátor Vodafone. Síť využívá existující základnové stanice používané k šíření mobilního signálu, dosahuje tak vynikajícího pokrytí – až 100 % venkovních prostor České republiky a 94 % populace uvnitř budov. Frekvenční pásmo není pouze jedno, Vodafone využívá licenční pásmo B8 (880-915 MHz *uplink*, 925-960 MHz *downlink*) pro pokrytí vnitřních prostor a pásmo B20 (832-862 MHz *uplink*, 791-821 MHz *downlink*) pro venkovní pokrytí. [26]

Tato síť má nejvyšší rozpočet rádiového spojení, konkrétně 164 dB. Signál má velmi dobrou pronikavost do budov, operátor dokonce udává, že zařízení se může nacházet i pod vodou nebo pod zemí. S rostoucí hloubkou pak samozřejmě rapidně klesá síla signálu. Maximální udávaná přenosová rychlost je 250 kilobitů za sekundu směrem do zařízení (*downlink*), ze zařízení potom 230 kilobitů za sekundu (*uplink*). [25]

Zařízení této sítě nejsou určena pro rychlý pohyb, obecně se maximální rychlost pohybu udává ve výši 6 km·h⁻¹. Problémem sítě je neschopnost jednoduchého přepnutí spojení mezi dvěma základnovými stanicemi, v této situaci je potřeba provést opětovnou registraci zařízení do sítě. [27]

4.1.4 LoRa

V praxi je možné se setkat se dvěma podobnými pojmy: LoRa a LoRaWAN. Označení LoRa je zkratkou anglických slov *Long Range*, tedy „dlouhý dosah“. Jedná se o způsob modulace informačního signálu do podoby elektromagnetických vln, v referenčním ISO/OSI modelu tedy představuje nejnižší, fyzickou vrstvu. LoRaWAN pak označuje komunikační protokol a architekturu sítě. V praxi jsou však tyto pojmy často zaměňovány a využívány i jiných významech, proto bylo rozhodnuto v rámci této práce používat pouze pojem „síť LoRa“, byť je tím často myšlen právě pojem „LoRaWAN“. [28]

Síť LoRa přináší oproti dvěma předchozím jednu zásadní výhodu – celý ekosystém je otevřený a je tak možné si pořídit a provozovat vlastní LoRa bránu, která danou oblast pokryje soukromou sítí. Pro komunikaci se v Evropě používá bezlicenčního pásma okolo frekvence 868 MHz. [25]

V České republice tuto technologii veřejně (může existovat řada soukromých sítí) využívají v podstatě dva operátoři, České Radiokomunikace a komunita The Things Network. Prvním z nich je klasický operátor vlastníci své základnové stanice, kterými dle poptávky pokrývá vybrané oblasti území. Koncová zařízení pak za poplatek připojuje do sítě obdobně, jako to dělají operátoři předchozích dvou zmíněných technologií Sigfox a NB – IoT.

Druhou z nich, komunitu The Things Network budují sami uživatelé a otevřeně ji poskytují i ostatním uživatelům zdarma. Koncový zákazník, který chce do této sítě připojit svá zařízení vůbec nemusí využívat vlastní brány a ani platit za registraci či konektivitu, naopak může bezplatně využít základnovou stanici jiného člena komunity – podmínkou je samozřejmě pokrytí dané oblasti touto bránou. Komunitu je současně možno bezplatně rozšířit zakoupením a provozováním vlastní brány, která bude následně rovněž přístupná všem komunitním členům. V kontrastu očividné výhody – používání sítě zdarma, však vyvstává zásadní nevýhoda ve formě nemožnosti garantovat kvalitu služby, neboť se majitel dané brány může kdykoli rozhodnout a svou bránu vypnout, čímž dojde ke ztrátě komunikačního spojení mezi senzory a internetem (pokud tyto senzory nemají v dosahu bránu jiného člena komunity).

Signál senzoru využívajícího síť LoRa může být přijat i více bránami současně, přičemž zpětnou komunikaci provádí ta zpravidla nejbližší. S výhodou tak je možno pokrýt požadované území signálem více bran, neboť při výpadku některé z nich nedojde ke ztrátě komunikace a ani není potřeba provést opětovnou registraci. [4]

Komunita TTN je rozšířena po celém světě, není tedy omezena hranicemi jednotlivých států či bran umístěných na daném území a zařízení je tak možno používat libovolně po světě (podmínkou je stejné frekvenční pásmo). Operátor ČRa začátkem roku 2021 představil možnost roamingu v rámci mnoha zemí světa, vzhledem k principu fungování sítě je dokonce možné využívat bran více poskytovatelů současně, čímž je možné zaručit vysokou spolehlivost komunikace.

Velikost uživatelské zprávy záleží na zvolených parametrech komunikace a pohybuje se od 51 do 222 bajtů. Přenosová rychlost rovněž závisí na dané konfiguraci, přičemž se pohybuje od 22 bitů za sekundu až po 27 kilobitů za sekundu. Bilance rádiového spoje činí 160 dB, čímž je zajištěn dostatečný dosah komunikace. Výhodou je možnost zpětné komunikace ze strany serveru směrem k senzorům a je tak možno tyto senzory vzdáleně ovládat, případně měnit jejich nastavení. [25]

Zařízení LoRa lze provozovat ve třech režimech, takzvaných třídách (*LoRa class*). Zařízení třídy A jsou nejrozšířenější a fungují jako běžné zařízení sítí LPWAN. Spojení s bránou sítě je po prvotní registraci navázáno až v momentě potřeby odeslat zprávu, ve zbylém čase se zařízení nachází v režimu spánku. Zařízení třídy B jsou nejméně rozšířená, fungují na principu periodického buzení koncového zařízení, kdy se senzor například každých 10 minut probouzí a naslouchá možné komunikaci ze strany brány. Pokud v časovém limitu žádnou zprávu neobdrží, přejde do režimu spánku a čeká na opětovné probuzení v čase dalšího komunikačního okna. Třída B je napříč operátory nejméně podporovaná (ČRa ani TTN ji v současné době nepodporují). Třída C odstraňuje časový interval mezi přijímacími okny používanými u třídy B a koncové zařízení tak případné komunikaci ze strany brány naslouchá neustále. Zařízení provozovaná v této třídě mají nejvyšší spotřebu, dosahují ale nejkratší doby odezvy (cca 1 sekunda).

Zajímavostí je současný rekord (k 15. březnu 2021) maximální dosažené vzdálenosti komunikace LoRa zařízení, který činí 832 km. Dne 16. dubna 2020 jej provedli členové komunity The Things Network z Nizozemska vypuštěním senzoru zavěšeného na meteorologickém balónu, který pak ve výšce 38 km, těsně před prasknutím nad územím Německa, učinil spojení s bránou umístěnou na vrcholku hory Radhošť v Beskydech. [29]



Obrázek 35 – Světový rekord v maximální dosažené vzdálenosti komunikace LoRa zařízení [29]

4.1.5 Vybraná komunikační technologie

Vzhledem k výše uvedeným základním vlastnostem vhodných a dostupných komunikačních technologií bylo v rámci této práce rozhodnuto o využití sítě LoRa, konkrétně komunity The Things Network. Hlavním argumentem je možnost provozování vlastní sítě bez potřeby placení paušálních poplatků či poplatků za množství přenesených dat nebo počtu registrovaných zařízení. Nevýhodou tohoto řešení je zmíněná nemožnost garantování kvality služby, tedy garance přenesení dat. Nicméně vzhledem charakteru práce – sběru dat o půdní vlhkosti jasně vyplývá, že se nejedná o kritickou aplikaci a ani výpadek v řádu desítek hodin či dokonce dnů nepředstavuje zásadní problém, neboť nezpůsobí žádné materiální škody ani žádnou újmu na zdraví. Předpokládá se navíc použití vlastní LoRa brány, problém výpadku služby způsobený vystoupením člena provozujícího potřebnou bránu tedy odpadá.

4.2 Návrh řídicí jednotky

Vybavit jednotlivé senzory umístěné v různých hloubkách vlastní komunikační jednotkou postrádá smysl, neboť je lze vzájemně spojit a využít pouze jediné centrální řídicí jednotky v rámci jedné sondy. Obdobně je tomu v případě napájecí části, kdy je výhodné řešit správu pouze jediného chemického zdroje elektrické energie, tedy výměny baterie, případně nabíjení akumulátoru a s tím spojenou instalaci ochranných obvodů zabráňující přebití, hlubokému vybití nebo odpojení zdroje v případě zkratu.

Jako základní prvek komunikace byl vybrán modul RN2483A, který přináší dobrý poměr ceny vůči složitosti integrace a spolehlivosti funkce. Modul má na starost veškerou komunikaci prostřednictvím sítě LoRa, jeho ovládání je prováděno pomocí rozhraní UART, komunikační rychlost je možné si zvolit (v základu je nastavena na 57 600 baudů). [30]

4.2.1 Testovací zařízení pro přenos dat

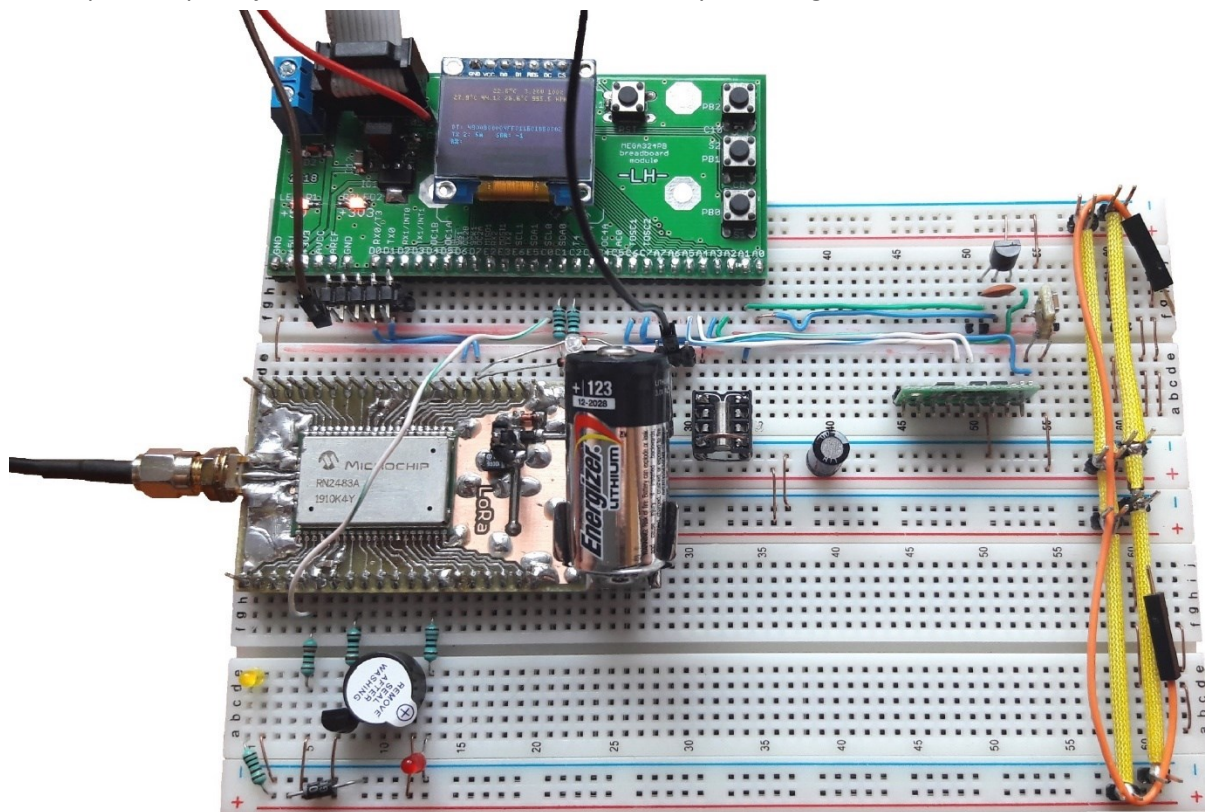
Před návrhem kompletní řídicí jednotky byla vyzkoušena funkčnost vybraného integrovaného modulu RN2483A verze 1.0.5. Proto byl vyroben přípravek pro umístění modulu do kontaktního nepájivého pole. Přípravek kromě samotného modulu obsahuje i držák pro umístění baterie typu CR123A, je tak možno zkoušet i bateriový provoz zařízení a optimalizovat spotřebu energie.

Základem zapojení je mikrokontrolér ATmega324PB, je tedy použit stejný řídicí prvek jako v případě samotných senzorů. Dále je k dispozici monochromatický grafický OLED displej s rozlišením 128 × 64 pixelů. Zapojení je dále doplněno o 3 tlačítka a stabilizátor napětí, upravující vstupní velikost napětí na výstupní hodnotu 3,3 V.

V průběhu vývoje bylo nepájivé pole osazeno dalšími moduly obsahujícími senzory enviromentálních veličin. Prvním z nich je deska plošných spojů osazená senzorem HS3001, který umožňuje měření teploty a vlhkosti vzduchu. Oproti jiným obdobným senzorům vyniká přesností měřených veličin, relativní vlhkost vzduchu dokáže změřit s přesností na $\pm 1,5$ %, teplotu poté s odchylkou nepřesahující $\pm 0,2$ °C. To vše při zachování velmi nízké spotřeby, výrobce udává průměrně 24,4 μ A při 14bitovém rozlišení a při velikosti napájecího napětí 3,3 V. [31]

Druhý připojený modul nese označení POLOLU-2126, jádrem je však součástka LPS331, která umožňuje měřit atmosférický tlak s absolutní přesností na $\pm 2,5$ hPa. Současně je možné tímto senzorem měřit i teplotu vzduchu. Oba moduly jsou pak připojeny pomocí I²C sběrnice. [32]

Třetím připojeným senzorem pak je integrovaný teploměr DS18B20, který je dle výrobce schopen měřit teplotu s přesností $\pm 0,5$ °C. Samostatný teploměr byl připojen pro vyzkoušení souběžného měření více senzorů současně a pro generování více dat, která byla následně posílána pomocí sítě LoRa, neboť právě teplotu je možno snadno ovlivnit a názorně vykreslit v grafu. [33]



Obrázek 36 – Testovací zařízení pro ověření komunikace sítě LoRa

Nepájivé pole bylo dále osazeno i krystalem s nominální frekvencí 32 768 Hz, který slouží jako časová základna interního časování odesílání zpráv.

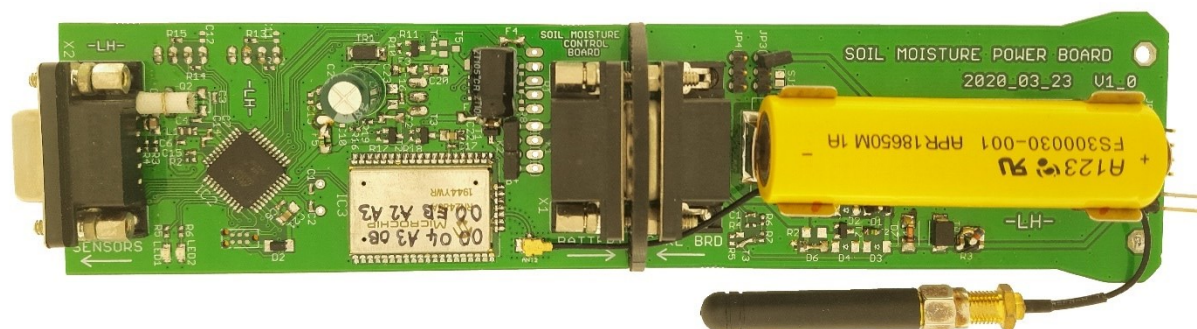
Navržené testovací zařízení zásadně pomohlo v rychlém zprovoznění komunikace v rámci sítě LoRa a umožnilo tak pokračení práce směrem k vytvoření samostatné desky řídicí jednotky.

4.2.2 Řídicí jednotka verze 1.0

Obvodové zapojení řídicí jednotky vychází ze zapojení testovacího zařízení konstruovaného v nepájivém poli, základní prvky zapojení tedy zůstaly stejné – mikrokontrolér ATmega324PB, komunikační modul RN2483A a externí krystal 32 768 Hz.

Zdroj energie (baterie či akumulátor) a jeho ochranné obvody nebyly v rámci řídicí jednotky řešeny, neboť se předpokládá použití více různých typů těchto energetických zdrojů, přičemž každý z nich vyžaduje jiné ochranné obvody. Proto bylo rozhodnuto řešit napájecí část samostatně, spojení s řídicí jednotkou je zajištěno stejnými konektory jako v případě senzorů – tedy 9pinovými D-sub konektory.

Nově bylo potřeba vyřešit připojení senzorů půdní vlhkosti. Jelikož bylo pro senzory zvoleno napájecí napětí ve výši 5 V, bylo potřeba zvýšit napájecí napětí z baterie právě na tuto hodnotu. Proto bylo přistoupeno k využití DC/DC měniče, konkrétně již sestaveného modulu POLOLU 2564. Toto řešení přináší výhodu velmi malé potřebné plochy na DPS, navíc lze snadno osadit ručně a zároveň disponuje požadovanými parametry – konkrétně dobrou proudovou zatížitelností (až 1,2 A). Nevýhodou je ale absence zkratové ochrany, proto byly sériově před i za regulátor umístěny vratné pojistky. [34]



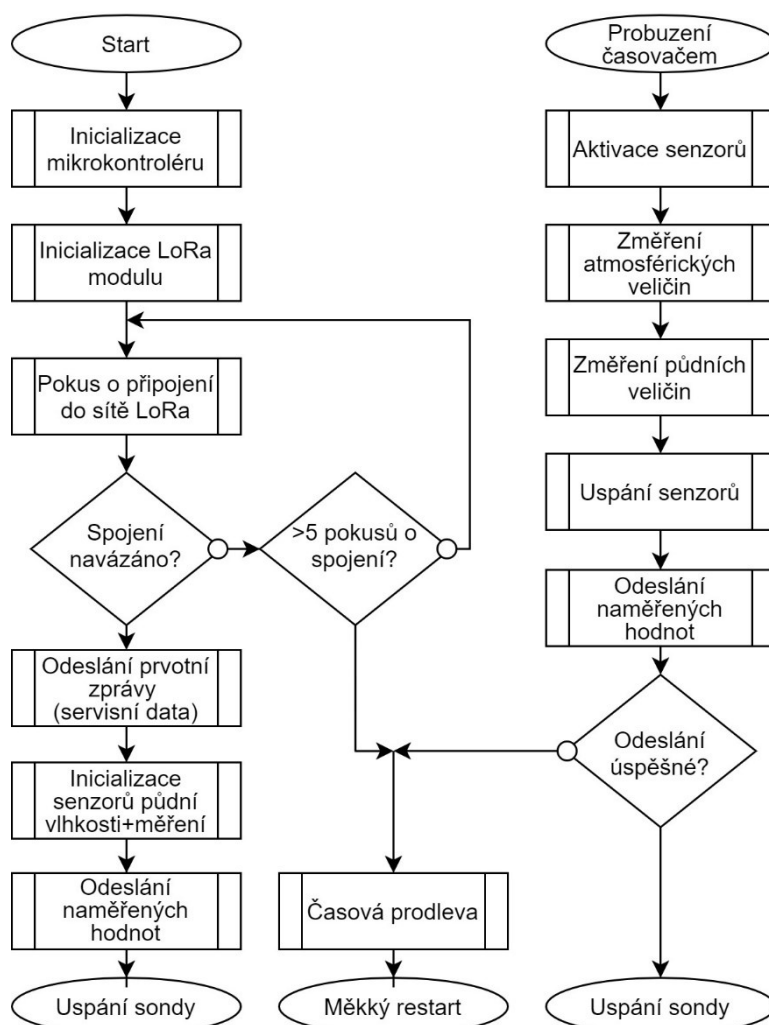
Obrázek 37 – Řídicí jednotka s připojenou napájecí částí, obě ve verzi 1.0

Vzhledem k dostatku místa na navrhované desce plošných spojů bylo nakonec rozhodnuto o přidání drátového komunikačního rozhraní sběrnice RS485. Sondu tak je možno provozovat i v drátovém režimu, navíc byla přidána možnost externího napájení. Výsledkem je možnost vzájemného propojení více sond v rámci jedné lokality, neboť byla řídicí jednotka vybavena fyzickým přepínačem adresy, pod kterou na sběrnici vystupuje. Drátové rozhraní je výhodné použít například při umístění sond v halách či sklenících, kde bezdrátová komunikace nemusí mít dostatečný dosah nebo je příliš rušena.

Současně lze sondy napájet centrálním externím napájením, například velkým fotovoltaickým panelem, v případě nedostatku energie je však stále možno využít interní zdroj, který tak může sloužit jako záložní napájení. Vytvořit lze i kombinované zapojení využívající jak drátové, tak i bezdrátové komunikační rozhraní, kdy jedno z nich, například drátové využívající sběrnici RS485, může být použito pro lokální zálohu dat, zatímco druhý typ datového připojení může sloužit k hlavnímu sběru dat, jejich vyhodnocení a případně zpětnému řízení sond (vzdáleně lze například změnit časový interval odesílání dat).

Vzdáleně lze kromě intervalu odesílání zpráv nastavit i vysílací výkon, tedy dosah zařízení a s tím spojenou spotřebu zařízení. Stejně tak je možno změnit i kódování signálu a s tím spojenou komunikační rychlost (SF7 – SF12). Programově je přitom zajištěno, že v případě nastavení nedostatečného vysílacího výkonu, jehož důsledkem je neschopnost navázání stabilního datového spojení, dojde k jeho zpětné korekci na původní, případně i vyšší hodnotu vysílacího výkonu. Stejný bezpečnostní princip je aplikován i v případě změny komunikační rychlosti (SF). Rovněž je možno na dálku změnit port na kterém jsou data ze senzoru odesílána.

Samotný algoritmus programu mikrokontroléru je v zásadě jednoduchý. Základem je samozřejmě inicializace mikrokontroléru a jeho periférií. Dalším důležitým krokem je inicializace modulu zajišťujícího LoRa komunikaci, zejména tedy nahrání identifikačních a bezpečnostních klíčů. Následuje pokus o připojení do sítě, v případě neúspěchu je pokus několikrát opakován. Pokud se opakovaně nelze do sítě připojit (například je zařízení mimo dosah brány nebo je brána nedostupná), dojde k usnutí sondy a opětovný pokus až po předem zvolené době. V případě úspěšného připojení jsou modulem uloženy bezpečnostní klíče a následně je odeslána prvotní inicializační zpráva obsahující informace o velikosti napájecího napětí (stavu baterie) a další servisní údaje. Po odeslání prvotní zprávy dojde k inicializaci senzorů půdní vlhkosti a prvním změření hodnoty. Naměřené údaje jsou vzápětí opět odeslány pomocí sítě LoRa. Poté celé zařízení přejde do režimu spánku a čeká na probuzení po uplynutí nastavené doby.



Obrázek 38 – Zjednodušený algoritmus programu řídicí jednotky

Po probuzení je zapnuto napájení senzorů půdní vlhkosti a je jim předán pokyn k postupnému vykonání měření. V době čekání na provedení měření půdních senzorů jsou vyčítány hodnoty z atmosférických senzorů, tedy například teploty nebo tlaku. Stejně tak je v mezičase změřeno napětí baterie a napětí fotovoltaického panelu. Jakmile dojde k ukončení veškerých měření a následnému vyčtení naměřených hodnot jsou veškeré senzory uspány a odpojeny od napájení. Dalším krokem je sestavení zprávy pro LoRa komunikaci, která je následně odeslána. Pokud je odeslání zprávy úspěšné, dojde k uspání komunikačního modulu a mikrokontroleru samotného, přičemž aktivní zůstává pouze obvod zajišťující probuzení zařízení po uplynutí nastaveného časového intervalu. V případě neúspěšného pokusu je mikrokontrolér uspán, přičemž po uplynutí nastavené doby je proveden takzvaný měkký restart, kdy zůstane zachován obsah některých proměnných. Tyto proměnné například uchovávají informace o důvodu provedení restartu, přičemž jejich hodnota je v případě následného úspěšného připojení do sítě LoRa odeslána v rámci prvotní, servisní zprávy.

4.2.3 Napájecí část verze 1.0

Napájecí část byla záměrně oddělena od řídicí části, jelikož toto řešení umožňuje samostatný vývoj obou částí bez potřeby úpravy obou desek.

Zpočátku bylo zvažováno povinné použití fotovoltaického panelu u každé sondy, přičemž napájení mimo dobu dostatečného slunečního svitu by zajišťoval velkokapacitní kondenzátor. Po výpočtech a zkušenostech s reálnou spotřebou celého zapojení sondy se ukázalo jako výhodnější použít namísto kondenzátoru akumulátor. Akumulátor sice rychleji degraduje a postupně ztrácí svou kapacitu, zejména při každodenním cyklování, nicméně vzhledem ke spotřebě zařízení dojde v noci pouze k nepatrnému vybití akumulátoru – ten tak není nikterak hluboce vybíjen a nedochází u něj k tak rychlé degradaci jako v případě pravidelného hlubokého vybíjení. Navíc i nejlevnější lithiové akumulátory svou kapacitou mnohonásobně převyšují kapacitu běžných velkokapacitních kondenzátorů, sonda tak vzhledem k nízké spotřebě externí napájení ve formě fotovoltaického panelu vůbec nemusí potřebovat, neboť na jedno nabití akumulátoru je možno odeslat mnoho tisíc zpráv. V případě celoročního provozu sond pak navíc zpravidla není potřeba každodenně kontrolovat a případně očišťovat sněhovou pokrývku z fotovoltaického panelu, neboť sonda je schopna fungovat i několik měsíců bez dobíjení, přičemž po přirozeném roztátí sněhu a odkrytí fotovoltaického panelu je akumulátor opět dobít. Výsledkem je tak zařízení schopné celoročního provozu bez potřeby údržby.

Obvodové schéma je v zásadě vcelku jednoduché, nachází se zde pouze malé množství součástek. Kladný pól akumulátoru je veden skrze vratnou polymerovou pojistku na ochranný obvod proti přepólování – unipolární tranzistor (P-MOSFET) nebo polovodičovou diodu. Výstup ochranného obvodu je do řídicí desky veden buďto přímo nebo skrze diodu zajišťující případný potřebný napěťový úbytek.

Záporný pól chemického zdroje energie je vyveden na kolíkovou lištu, která umožňuje sériové vřazení ochranného obvodu v případě použití akumulátoru bez integrované ochrany. Tuto kolíkovou lištu je možno nahradit pájenou propojkou umístěnou na vyhrazeném místě na desce plošných spojů.

Baterie či akumulátory je možno použít ve dvou kusech. Držáky pro ně určené je možno zapájet ve dvou konfiguracích odlišných velikostí, buďto pro umístění baterie velikosti CR123A nebo pro články velikosti 18650.

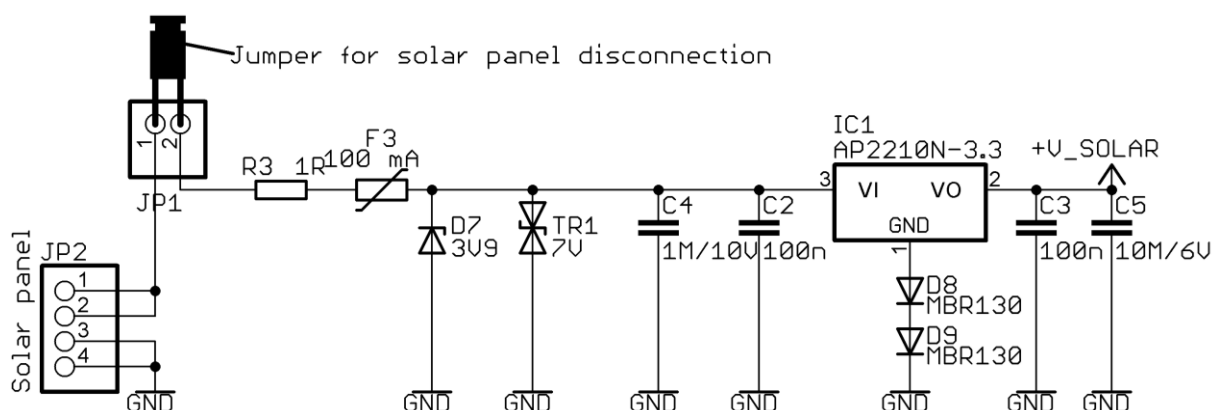
Nabíjecí část je zde řešena velmi primitivně, neboť spoléhá na ostatní prvky použitého zapojení. Prvním a nejdůležitějším z nich je použití vhodného ochranného obvodu akumulátoru, tedy zejména takového, který je v případě nadměrné velikosti nabíjecího napětí schopen článek odpojit a zabránit

tak jeho destrukci. Dalším potřebným prvkem je s fotovoltaickým panelem sériově řazený rezistor, který limituje maximální možný nabíjecí proud. Používaný panel o rozměrech 80 × 55 mm je však schopen poskytnout proud nejvýše přibližně 100 mA, rezistor tak v tomto případě nemusí být potřeba. Zmíněný panel při přímém osvětlení generuje naprázdno napětí okolo 6,5 V, v případě výskytu vyššího napětí dojde k zafungování přepětové ochrany ve formě transilu. Napětí panelu je navíc omezováno Zenerovou diodou o hodnotě potřebného nabíjecího napětí, přebití akumulátoru tak zabraňují hned 3 prvky.

Aktuální napětí fotovoltaického panelu je v případě potřeby měření přivedeno skrze unipolární tranzistor na odporový napěťový dělič, zajišťující snížení tohoto napětí na potřebný rozsah A/D převodníku, který posléze změří jeho velikost. Tímto je možno kromě hrubého odhadu nabíjení akumulátoru sledovat i intenzitu slunečního svitu v průběhu dne. Tyto údaje je poté možno rovněž využít pro pěstitelské a zemědělské účely.

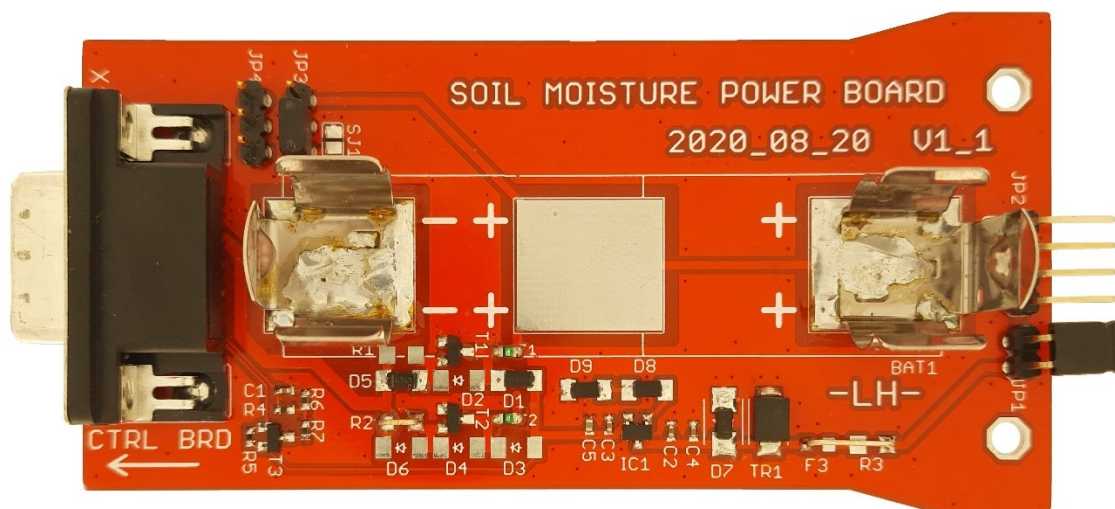
4.2.4 Napájecí část verze 1.1

Nová verze obvodově odpovídá předchozí verzi, zásadní rozdíl zde ale představuje nabíjecí část. Ta je nově doplněna o stabilizátor napětí s nízkým úbytkem, který zajišťuje přesnější kontrolu napětí používaného k nabíjení akumulátoru. Použit je stabilizátor s nominální hodnotou 3,3 V, toto napětí je ale možno upravit sériovým zařazením diod s potřebným napěťovým úbytkem do nulové větve stabilizátoru. Vstup nabíjecího obvodu byl rovněž nově opatřen vratnou pojistkou pro případ výskytu nadměrného nabíjecího proudu.



Obrázek 39 – Schéma nabíjecí části ve verzi 1.1

Navržená deska plošných spojů je rovněž značně podobná předchozí verzi, z důvodu lepšího rozeznání byla proto opatřena poněkud netradiční červenou nepájivou maskou. V horní části je deska vhodně rozšířena tak, aby zajistila držení elektroniky sondy v konstantní výšce a zabránila jejímu nežádoucímu poklesu v rámci trubky.



Obrázek 40 – Napájecí část ve verzi 1.1

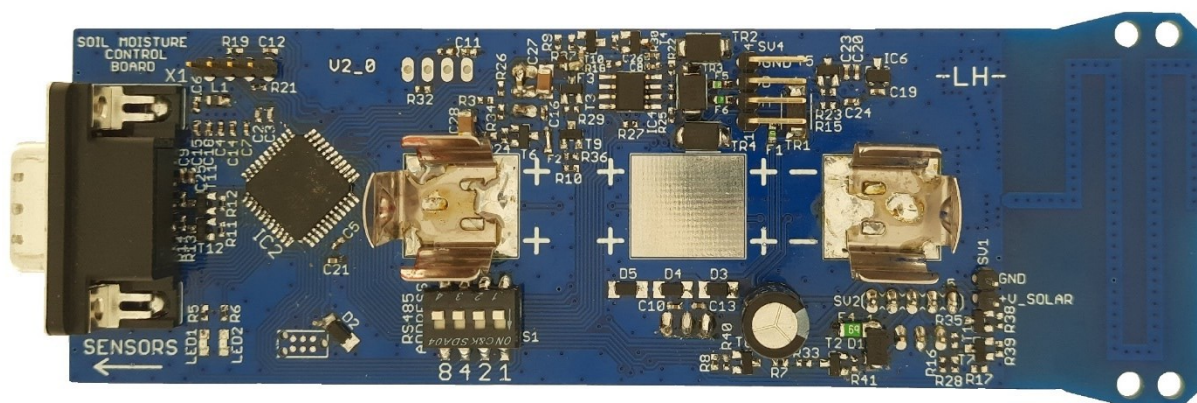
4.2.5 Řídicí jednotka verze 2.0

Řídicí deska ve verzi 2.0 je koncipována zároveň jako řídicí i napájecí. Po několika vývojových iteracích samostatných řídicích a napájecích desek došlo k jejich sloučení. Důvodů bylo několik, hlavní výhodou je menší celkový rozměr, respektive výsledná délka sondy. Rovněž původní důvod vedoucí k rozdělení napájecí a řídicí části na samostatné celky již pominul – došlo k odladění hlavních neduhů obou částí zapojení a další vývoj obsahující zásadní změny desky plošných spojů se již nepředpokládá.

Podstatnou změnou je přidání integrované antény, která je tvořena meandrem leptaným přímo na DPS. Integrovaná anténa má sice oproti externím typům menší zisk, a tedy kratší komunikační dosah, není ale potřeba vyvádět anténní konektor mimo krabičku – je tak odstraněno místo potenciálního vniku vody dovnitř sondy. V případě potřeby použití externí antény je ale stále možno využít osazený U.FL (IPX/AMC) konektor, tak jako tomu bylo u předchozích verzí – je tak zaručena zpětná kompatibilita se staršími verzemi.

Další podstatnou změnou je možnost nabíjení integrovaného akumulátoru skrze konektor rozhraní RS485. Nabízí se tedy možnost spojení více blízkých senzorů a jejich připojení na centrální napájení, kterým může být například i větší fotovoltaický panel. V případě výpadku tohoto napájení (například v noci) mohou senzory pracovat bez přerušení dále díky integrovanému akumulátoru. Po následném obnovení hlavního napájení pak dojde k dobití akumulátorů.

Méně podstatnou změnou je možnost přímého měření napětí integrovaného akumulátoru či baterie bez napěťových úbytků na ochranných prvcích (diody, pojistky, ...). Díky tomu je možné přesněji vyhodnotit zbývající kapacitu použitého zdroje elektrické energie.



Obrázek 41 – Řídicí jednotka verze 2.0

Algoritmus programu řídicí jednotky verze 2.0 z velké části odpovídá předchozí verzi, program však byl doplněn o řadu nových funkcí, které adresují zejména hlavní neduh předchozí verze – složitou konfiguraci. Pro každou z nich bylo doposud nutné vždy kompilovat firmware znova, neboť bylo potřeba změnit identifikační a bezpečnostní klíče. Tento přístup je při výrobě více kusů sond značně zdlouhavý, a navíc ponechává velký prostor pro vnesení lidské chyby do celého konfiguračního řetězce.

Zásadní novinkou programu pro řídicí jednotky verze 2.0 je umístění identifikačních a přístupových klíčů do paměti typu EEPROM integrované v mikrokontroléru, kterou je možno přeprogramovat bez ohledu na hlavní programovou paměť. EEPROM nově obsahuje i základní konfigurační hodnoty sondy, tedy například časový interval periodického odesílání zpráv, číslo portu používaného při odesílání zpráv, hodnotu používaného vysílacího výkonu nebo požadovanou komunikační rychlost. Rovněž je zde uloženo i datum programování a verze aktuálního firmwaru mikrokontroléru. Díky tomu je možno snadno identifikovat neznámou sondu například v rámci servisu nebo konfigurace v terénu.

V paměti typu EEPROM jsou nově rovněž uloženy typy použitých senzorů atmosférických veličin, a to včetně pinů použitých k jejich propojení s řídicí deskou. Program pak při inicializaci automaticky rozpozná použité senzory a komunikuje s nimi pomocí zvolených pinů. Pokud tak například chceme nově do již fungující sondy instalovat externí teploměr DS18B20, stačí v paměti EEPROM přeprogramovat pouze několik bajtů sdělujících typ senzoru a požadované piny daných portů mikrokontroléru. Samotný program sondy pak není potřeba jakkoli měnit.

Další novinkou je automatická detekce počtu a pořadí připojených senzorů půdní vlhkosti, včetně jejich re-adresace při tvrdém restartu sondy (odpojení napájení). V praxi je tak možné sondu sestavit bez předchozí separátní konfigurace každého senzoru zvlášť, tedy bez nastavení adresy, pod kterou vystupuje na I²C sběrnici. Program řídicí jednotky při startu pomocí adresních pinů automaticky senzory přeadresuje dle jejich aktuálního počtu a řazení za sebou. Při změně počtu senzorů půdní vlhkosti nebo jejich pořadí tak není potřeba jakkoli zasahovat do programu a ani EEPROM řídicí jednotky. Velikost odesílané zprávy pomocí komunikace LoRa je rovněž automaticky nastavena dle potřeby, tedy dle počtu připojených senzorů.

4.2.6 Program pro správu paměti EEPROM řídicí jednotky

Konfigurace sond založených na řídicí jednotce verze 2.0 již probíhá pomocí změny hodnot v paměti EEPROM. Jelikož je však v paměti uloženo poměrně velké množství různých hodnot a údajů, je jejich změna poměrně komplikovanou záležitostí vyžadující dokonalou znalost rozložení a významu jednotlivých bitů a bajtů paměti. Pro zjednodušení této činnosti a rovněž ve snaze o kontrolu

případných chyb konfigurace bylo rozhodnuto o vytvoření konfiguračního programu pro počítače využívající operační systém Windows (platforma .NET). Program samotný je napsán v jazyce C#. Komunikaci s mikrokontrolérem řídící jednotky zajišťuje programátor USBasp, k jeho ovládní je využit program AVRdude.

Program samotný sestává z několika částí, přičemž základní z nich se nachází hned na první záložce – konfigurace klíčů a připojených externích senzorů. Zde je možno nastavit identifikační a bezpečnostní klíče využitě v rámci LoRa komunikace. Dále je zde možno navolit až 21 připojených senzorů různých veličin včetně pinů, na které jsou připojeny. Ve spodní části je možno si zvolit již předdefinovanou konfiguraci, případně je možno si vytvořit vlastní nahráním souboru ve formátu XML. V případě vyčtení obsahu paměti EEPROM a následném dekódování jsou ve spodní části zobrazeny důležité údaje, tedy datum a čas naprogramování a čas kompilace použitého firmwaru mikrokontroléru, včetně jeho verze. Rovněž je zde možno vyčíst a upravit časový interval periodického odesílání zpráv.

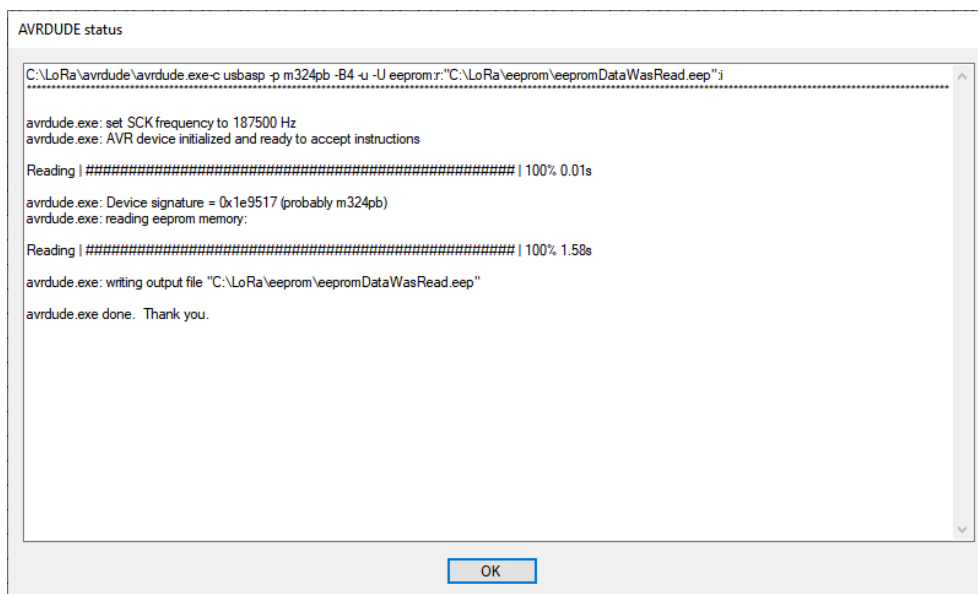
Obrázek 42 – Konfigurační program pro správu EEPROM, základní konfigurace

Další důležitou funkcí vytvořeného programu je grafické znázornění paměti EEPROM. Význam jednotlivých bajtových bloků je barevně odlišen, při najetí kurzoru myši nad určitou oblast je posléze zobrazena nápověda s popisem, strukturou a významem příslušných bajtů. Bajty paměti, které jsou přehledně zobrazeny v tabulce je navíc možno ručně změnit a tuto novou konfiguraci posléze jediným stiskem tlačítka nahrát pomocí programátoru USBasp přímo do řídící jednotky. Úprava konfigurace

[illegible]

Program kromě pouhé správy paměti umožňuje i nahrání hlavního programu (firmwaru) řídicí jednotky, a to včetně změny takzvaných pojistek (základní konfigurace) mikrokontroléru. Rovněž je k dispozici surový výpis vyčtené paměti EEPROM, kde je možno zobrazit například kontrolní součty nebo odhalit případné chyby vzniklé při vyčtení obsahu paměti.

62



Obrázek 44 – Průběh práce programátoru je uživateli textově zobrazen

Počítačový program byl od začátku vyvíjen za účelem nahrazení ostatních, jinak potřebných programů, bez kterých by nebylo možné firmware a následně potřebnou konfiguraci nastavit a do mikrokontroléru nahrát. Proto zde bylo přidáno tlačítko, které spustí automatickou programovací a konfigurační sekvenci. Ze strany obsluhy je pouze potřeba z rolovací nabídky vybrat přednastavenou konfiguraci externích senzorů. Bezpečnostní klíče není potřeba ručně vypisovat, neboť budou vygenerovány programem automaticky na základě unikátního klíče generovaného výrobcem LoRa modulu. Po stisku tlačítka je tento klíč pomocí specializovaného firmwaru nejprve vyčten, následně se vygenerují ostatní bezpečnostní klíče a posléze je do mikrokontroléru nahrán aktuální firmware. Po kontrole správnosti nahrání firmwaru (verifikaci) je do paměti EEPROM zapsána zvolená konfigurace včetně vygenerovaných klíčů, která je opět verifikována. Následuje krátká časová prodleva, kdy je mikrokontroléru v řídicí jednotce umožněn běh, přičemž ten ze svého programu vyčte údaje o verzi a datu kompilace a uloží tyto údaje do EEPROM. V poslední fázi automatického cyklu, po uplynutí prodlevy, je obsah paměti EEPROM vyčten, dekodován do lidsky čitelné podoby a následně zobrazen na obrazovce počítače. Tímto je možno zkontrolovat správně provedené naprogramování a nakonfigurování řídicí jednotky. Díky této automatické sekvenci může programování a konfiguraci sond půdní vlhkosti po krátkém zaškolení provádět i osoba bez jakéhokoli elektrotechnického vzdělání, což je v případě výroby mnoha kusů sond jednoznačně vítané.

5 Návrh a realizace vývojového a kalibračního zařízení

V průběhu testování sestavených senzorů na různých lokalitách vyvstala potřeba senzory nejen jednoduše kalibrovat nebo vyzkoušet správnou funkci, ale také zjistit kvalitu signálu sítě LoRa přímo na daném místě. Samozřejmě není žádoucí zjistit až po instalaci, že v daném místě je nedostatečný signál, například blokováný blízkou budovou nebo kovovou konstrukcí skleníku. Proto bylo přistoupeno k vytvoření kombinovaného zařízení, spojující Kalibrátor s LoRa zařízením. V podstatě se jedná o vylepšenou řídicí jednotku používanou v samotných sondách půdní vlhkosti, doplněn však byl grafický OLED displej a pětice tlačítek. Pro snadnou přenositelnost a použití v polních podmínkách je samozřejmostí bateriové (nebo akumulátorové) napájení, stejně tak i vhodná krabička zabraňující znečištění nebo poškození elektroniky samotné. Vzniklé kompaktní multifunkční zařízení je tak při instalaci senzorů velmi vítaným pomocníkem.

Kalibraci senzorů lze provést několika způsoby, stejně tak i případnou kontrolu dostatečné síly signálu sítě LoRa v dané lokalitě. Ve prospěch úspory času vývoje se zpočátku jevílo jako výhodné využít přímo řídicí jednotku sondy, ke které by byly připojeny další potřebné periferie – zejména tlačítka a displej nebo alespoň více signalizačních LED. Od tohoto řešení ale bylo záhy upuštěno, neboť by takové zařízení nebylo schopné splnit veškeré požadavky, zejména kvůli nízkého počtu dostupných volných pinů mikrokontroléru. Současně by takové řešení bylo příliš rozměrné pro pohodlné ovládání jednou rukou. Proto bylo přistoupeno k vytvoření zcela nového zařízení, navrženého přímo pro konkrétní účely.

5.1 Popis zapojení

Zapojení do velké míry vychází ze zapojení řídicí jednotky sondy půdní vlhkosti. Základem je mikrokontrolér ATmega324PB a komunikační LoRa modul RN2483N. Rovněž je zde přítomen zvyšující DC/DC měnič pro zajištění konstantní velikosti napájecího napětí půdních senzorů, konkrétně 5 V. Nechybí pak ani externí krystal hodinového signálu o nominální frekvenci 32 768 Hz.

Hlavní změnou je přidání grafického OLED displeje s rozlišením 128 × 64 pixelů a řadičem SSD1306. Tento displej byl zvolen pro svou dobrou dostupnost, nízkou spotřebu a jednoduchost ovládání. Pro výpis textu bylo vytvořeno hned několik fontů různé velikosti, přičemž u nejmenšího z nich mají jednotlivé znaky rozměr pouze 3 × 5 pixelů. Displej je možno pomocí příkazů uspat a snížit tak jeho spotřebu, nicméně ve snaze o další snížení spotřeby je možné displej od napájení zcela odpojit. Celé zařízení se tak svou spotřebou velmi blíží spotřebě samotné řídicí jednotky, ze které je toto zapojení odvozeno.

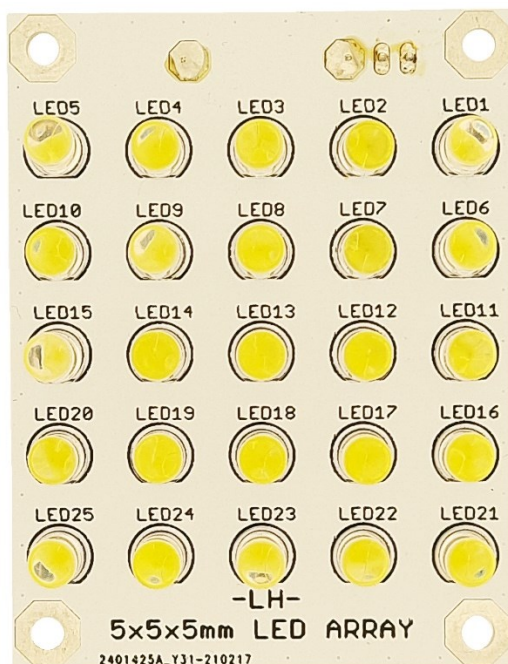
Pro přehlednější ovládání zařízení bylo programově vytvořeno menu, přičemž aktuálně zvolená položka je zvýrazněna. K pohybu v menu pak slouží pětice tlačítek.



Obrázek 45 – Detail obrazovky kalibračního zařízení

Kalibrační a testovací zařízení nemá integrovanou anténu, neboť je předpokladem použití různých typů externích antén v závislosti na aktuální potřebě. Zařízení bylo navrženo i za účelem testování vhodnosti různých antén pomocí zjištění údajů RSSI (síla přijímaného signálu) a SNR (poměr signálu k šumu) vyčtených z modulu LoRa komunikace. Ty umožňují odhalit alespoň základní vlastnosti použité antény.

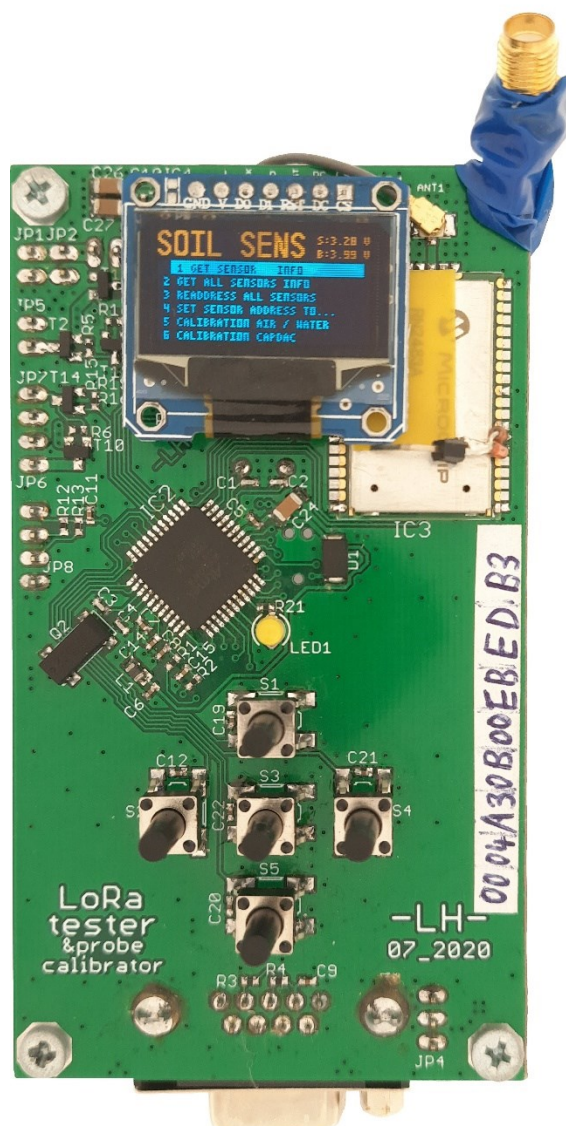
Samozřejmostí zapojení je přítomnost 9pinového konektoru D-sub, který slouží zejména k připojení senzorů půdní vlhkosti. Vzhledem k univerzálnosti celého zařízení je ale tímto konektorem možno pomocí adaptéru připojit i jiné senzory, například čidlo atmosférického tlaku nebo teploty. Pro tento typ senzorů je navíc k dispozici ještě separátní konektor ve formě kolíkové lišty. Zařízení je tak možno použít i k ověření funkčnosti jiných než půdních senzorů. Program navíc umožňuje autonomní režim, kdy se celé zařízení chová jako běžný LoRa senzor, který periodicky měří zvolenou veličinu a naměřené hodnoty poté bezdrátově odesílá do centrálního úložiště ke zpracování.



Obrázek 46 – Deska plošných spojů s rastrem 5 × 5 LED

Při instalaci a servisu již přímo v terénu instalovaných sond půdní vlhkosti často vyvstala potřeba použít svítilnu, a to nejen za zhoršených světelných podmínek, ale zejména pro kontrolu stavu vnitřního prostoru těla půdních sond. Proto se jevílo jako výhodné takovou funkčnost přidat i do tohoto navrhovaného zařízení, k dispozici jsou dokonce dva nezávislé spínané okruhy. Toho bylo využito pro vytvoření jedné hlavní a výkonné svítilny sestávající ze 25 bílých LED průměru 5 mm, přičemž druhý okruh má na starost pouze 6 LED a slouží tak spíše jako pouhé přisvětlení. Oba okruhy je možno ovládat programově pomocí menu, druhý, méně výkonný okruh, je navíc možno nezávisle ovládat zvlášť vyhrazeným tlačítkem.

Zařízení obsahuje hned dva držáky baterií (nebo akumulátorů), přičemž jeden je určen pouze pro baterie typu CR123A, u druhého je možno zvolit buďto totožnou velikost baterií nebo použít články velikosti 18650. Oba typy však není možno kombinovat. V případě absence ochrany integrovaných přímo v článku je možno připojit externí ochranné obvody pomocí kolíkové lišty. Současně je možno připojit i nabíjecí obvod a také zpětný zvyšující měnič, díky čemuž je možno využít toto zařízení jako záložní zdroj napájení pro různá zařízení, tedy jako takzvanou *power-banku*.



Obrázek 47 – Pomocné vývojové a kalibrační zařízení – „Kalibrátor“ ve spojení s LoRa zařízením

Sestavené zařízení bylo umístěno do na míru navržené krabičky, která byla vyrobena pomocí 3D tisku. Krabička disponuje montážními otvory pro centrální vypínač, tlačítko pomocného přisvětlení a externí anténu. Současně je zde vyhrazeno místo i pro nabíjecí modul (konektor mikro USB), který je kombinovaný s modulem zvyšujícího DC/DC měniče osazeného USB konektorem typu A. Krabička rovněž umožňuje instalaci obou světelných okruhů (6 a 25 LED). Samozřejmostí je průzor na displej a otvory pro tlačítka, stejně tak i otvor pro 9pinový D-sub konektor typu samice sloužící pro připojení senzorů.



Obrázek 48 – Vývojové a kalibrační zařízení v krabičce

5.2 Dostupné funkce pro sondy půdní vlhkosti

Navržené zařízení díky přítomnosti grafického displeje a tlačítek umožňuje více funkcí než samotná řídicí jednotka sondy. Zásadní výhodou je okamžité zobrazení hodnot na displeji, díky čemuž je možno jednotlivé senzory nejen snadno konfigurovat, ale také zpětně diagnostikovat v případě poškození nebo úplné nefunkčnosti.

5.2.1 Nastavení a vyčítání kalibračních hodnot

Základní požadovanou funkcí je nastavení kalibračních hodnot, neboť bez nich senzory půdní vlhkosti generují pouze surová data aktuální naměřené kapacity. Tyto kalibrační hodnoty nastavují minimum a maximum, přičemž minimum odpovídá umístění senzoru na vzduchu (0% vlhkost půdy) a maximum pak ponoření senzoru do vody (100% vlhkost půdy). Limitní hodnoty není možno pouze nastavit, ale také vyčíst, díky čemuž je možno v případě problémů zkontrolovat správné nastavení senzoru.

5.2.2 Nastavení konkrétní I²C adresy senzoru

Navržené zařízení umožňuje nastavení specifické adresy každého senzoru zvlášť a je tak možné zkontrolovat funkci senzorů při umístění v různé hloubce a pořadí v rámci následně sestavené sondy. Zároveň je pomocí této funkce možné simulovat různé poruchové scénáře, kdy například jeden senzor z řetězce neodpovídá.

5.2.3 Hromadné nastavení I²C adresy pro více senzorů

Velmi potřebnou funkcí je automatická adresace senzorů v rámci sondy. Aby při výrobě nemuselo být pevně určeno pořadí senzorů, tedy jejich adresa, bylo přistoupeno k ukládání této hodnoty do paměti EEPROM, kterou je možno snadno měnit i bez zásahu do hlavního programu senzoru. Při pospojování senzorů do výsledného zapojení sondy tak není následně potřeba, díky funkci hromadné adresace, ručně nastavovat adresu každého senzoru zvlášť. Díky vzájemnému propojení adresních pinů a správného komunikačního algoritmu sběrnice I²C se senzory samy adresně vzestupně seřadí. Novou adresu si každý senzor uloží do EEPROM a dále na sběrnici vystupuje už pouze pod ní.

5.2.4 Vyčtení aktuálně naměřených hodnot jednoho senzoru

Kromě hodnoty půdní vlhkosti je možné vyčíst i kalibrací neovlivněnou hodnotou naměřené kapacity půdy. Rovněž lze vyčíst aktuální teplotu čipu zajišťujícího měření půdní vlhkosti. Stejně tak je vyčítána i hodnota napájecího napětí jednotlivých senzorů. V okamžiku jsou tak na obrazovce zobrazeny veškeré dostupné informace o daném senzoru, díky čemuž je nejen možné zkontrolovat správnou funkci, ale také odhalit případnou poruchu nebo špatné nastavení senzoru.

5.2.5 Vyčtení aktuálně naměřených hodnot více senzorů současně

Zařízení umožňuje i hromadné vyčtení všech senzorů současně v rámci jedné sondy. Touto funkcí tak lze velmi rychle zkontrolovat funkčnost již vzájemně spojených senzorů bez potřeby kontroly každého senzoru zvlášť. Odhalení vadného senzoru v řetězci je tak velmi jednoduché a časově nenáročné, díky čemuž je i následná oprava nebo případně výměna značně ulehčena a zrychlena.

5.3 Dostupné funkce LoRa zařízení

LoRa zařízení umožňuje kromě samotné komunikace nastavení prakticky všech potřebných parametrů, jako například vysílacího výkonu nebo časového intervalu automatického odesílání zpráv.

5.3.1 Výběr předdefinovaného zařízení

V EEPROM mikrokontroléru jsou uloženy klíče potřebné pro připojení LoRa zařízení do sítě. K dispozici jsou 2 předdefinovaná zařízení, mezi kterými si lze vybrat. Rovněž je možné zvolit o jakou třídu LoRa zařízení se jedná – A, B nebo C.

5.3.2 Odesílání uživatelem definovaných zpráv

Zařízení umožňuje manuální nastavení jak jednotlivých bitů dané zprávy, tak i délky zprávy. Nastavit lze i perioda automatického opakování odesílání zpráv. Díky této funkci je možno simulovat odeslání zprávy dané sondy s potřebnými hodnotami.

5.3.3 Odesílání zpráv obsahujících data z různých senzorů

Díky osazenému konektoru je možno připojit jak senzory půdní vlhkosti, tak i různé další senzory. Nejčastěji jsou využívány senzory HS3001, LPS331 a DS18B20, které kromě měření teploty umožňují měření relativní vlhkosti vzduchu, respektive atmosférického tlaku.

Tak, jako u uživatelem definovaných zpráv lze i v tomto případě nastavit časový interval automatického odesílání zpráv, a tedy i intervalu mezi provedením měření jednotlivých senzorů. Navržené zařízení tak je možno použít i jako samostatně a automaticky fungující LoRa senzor.

5.3.4 Nastavení parametrů bezdrátové komunikace

Nejčastěji využívanou funkcí je nastavení vysílacího výkonu. Tím je možno zkusit reálný dosah zařízení přímo v terénu a zjistit optimální výkon, který přináší kompromis mezi dosahem komunikace a spotřebou zařízení při vysílání. Samozřejmostí je i možnost nastavení dalších parametrů komunikace, konkrétně komunikačního portu a typu modulace (*spreading factor* v rozmezí 7 až 12).

5.3.5 Zkouška provozu LoRa zařízení ve třídě C

Zařízení bylo vyvíjeno i s myšlenkou provozu LoRa ve třídě C, tedy kontinuálního příjmu dat směrem z brány do zařízení. Samozřejmě je potřeba brát v potaz zvýšenou spotřebu v tomto režimu. Výhodou je velmi rychlá reakce zařízení (cca 1 s) na odeslaná data z nadřazeného řídicího systému. Typickým příkladem využití je ovládání zavlažovacího zařízení, které by nemuselo periodicky odesílat zprávy za účelem navázání komunikace (LoRa třídy A), a tedy i příjmu dat ze strany nadřazeného systému – pokynů k řízení závlahy.

Komunita The Things Network sice v současné době provoz zařízení ve třídě C nepodporuje, nicméně funkčnost tohoto režimu byla ověřena využitím bran společnosti České Radiokomunikace.

5.3.6 Zobrazení přijatých dat včetně případné reakce

Na displeji se zobrazují přijaté zprávy odeslané směrem ze serveru do zařízení. Zároveň je možné doprogramovat reakci na příjem konkrétní zprávy, je tedy možné vzdáleně nastavit parametry zařízení obdobně jako tomu je u řídicí jednotky sondy půdní vlhkosti. Příkladem může být vzdálená změna časového intervalu pro odesílání zpráv nebo změna vysílacího výkonu.

5.3.7 Zobrazení síly signálu

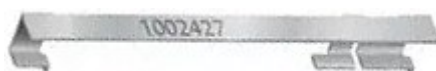
Velmi užitečnou funkcí je možnost zobrazení základních parametrů bezdrátového spojení, tedy naměřené síly signálu (RSSI) a poměru signálu k šumu (SNR). Díky těmto parametrům lze snadno určit vhodnou polohu pro umístění sondy půdní vlhkosti z hlediska zajištění kvalitního datového spojení. Rovněž je možné ve spojení se změnou vysílacího výkonu a modulace (SF) dosáhnout optimálního kompromisu mezi kvalitou komunikace a spotřebou sondy při odesílání naměřených hodnot.

5.3.8 Testování interních antén pro řídicí jednotku sondy

Navržené zařízení se stalo neocenitelným pomocníkem při vývoji druhé verze řídicí jednotky, neboť bylo použito k výběru vhodné interní antény (pásmo 868 MHz). Na základě průzkumu bylo vybráno 6 různých zapojení antén, které byly vyrobeny a následně samostatně zkoušeny. Pro výběr výsledné správné antény je zapotřebí znát více parametrů a nelze tak jednoznačně určit, která anténa je obecně nejlepší, neboť každá z antén se může za určitých situací chovat jinak (například změna zemnicí plochy značně ovlivňuje impedanci antény). Velmi důležitým parametrem je směrovost antény. U řídicí jednotky bylo vždy počítáno se všesměrovou anténou, proto byly parametry antén vždy měřeny při více různých natočeních a polohách vůči LoRa bráně. V rámci této práce byla pro výběr správné antény rozhodující hodnota parametrů RSSI a SNR, neboť právě tyto dva parametry lze měřit přímo zvoleným komunikačním LoRa modulem. Obecně je však potřeba brát obě naměřené hodnoty s jistou rezervou, neboť se jejich hodnota poměrně značně mění i v rámci těsně za sebou provedených měření.

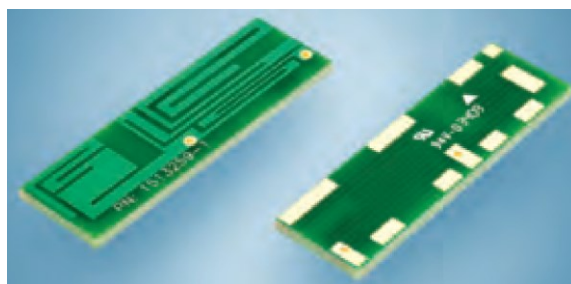
Samotné testování antén probíhalo na venkovním otevřeném prostranství, testované antény byly vždy umístěny na dřevěné podložce ve výšce 60 cm nad zemí. Anténa brány sítě LoRa se nacházela v přímé viditelnosti bez překážek a ve výšce 3 m nad terénem. Vzdálenost, na kterou probíhalo měření testovaného bezdrátového spojení byla přibližně 210 m. V době měření bylo oblačno, naměřená teplota vzduchu byla 16 °C při relativní vlhkosti 76 %.

První testovanou anténou tvoří kovový plíšek, určený pro povrchovou montáž. Pomocná deska plošných spojů byla navržena dle katalogového listu výrobce. Součástí zapojení antény je dále celkem 6 pasivních součástek – 2 kondenzátory a 4 nulové rezistory pro jemné doladění. Při testování anténa sice fungovala, nicméně s průměrnou hodnotou RSSI rovnu -108,2 dBm a SNR odpovídající 4,3 dB se v porovnání s ostatními umístila až na pátém místě. [35]



Obrázek 49 – První testovaná interní anténa [35]

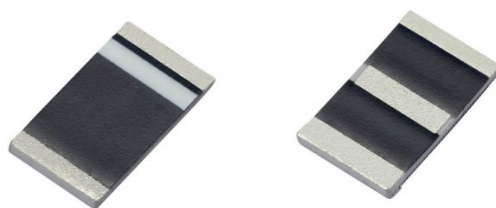
Druhou anténou tvoří plošný spoj s leptanými meandry. Ten byl dle pokynů výrobce umístěn na druhou desku, která byla osazena kabelem s SMA konektorem. Naměřené parametry RSSI a SNR byly -99,7 dBm, respektive 5,5 dB. Ve výsledném pořadí se anténa umístila na třetím místě.



Obrázek 50 – Druhá testovaná interní anténa [36]

Základ třetího testovaného kusu tvoří SMD keramická anténa, která je dle doporučeného zapojení výrobce doplněna o 4 pasivní součástky – 3 kondenzátory a 1 cívku. Výhodou tohoto zapojení je jeho velmi malá velikost, současně však tato anténa dosáhla jednoznačně nejlepších výsledků, hodnoty RSSI -94,5 dBm a SNR roven 6,3 dB. Svými parametry tak dokonce překonala i externí referenční anténu.

Jedinou nevýhodou zůstává cena tohoto zapojení, která se leptaným meandrovým anténám nemůže rovnat.



Obrázek 51 – Základ třetí testované interní antény [37]

Čtvrté testované zapojení je velmi podobné tomu předchozímu, základem je opět keramický prvek, určený pro povrchovou montáž. K němu jsou ve tvaru π -článku přidány 2 kondenzátory a 1 cívka. Přes svou podobnost s předchozím zapojením však tato anténa ve srovnání dopadla nejhůře, RSSI bylo změřeno s hodnotou -122,7 dBm a hodnota SNR byla naměřena jako -1,3 dB.



Obrázek 52 – Základ čtvrté testované interní antény [38]

Pátou testovanou anténou tvoří meandr vyleptaný přímo na desku plošných spojů. Použitý tvar se označuje jako převrácené F, navržená anténa pak představuje kompromis mezi vyzařovacím výkonem, fyzickou velikostí a cenou takto vytvořené antény. Konkrétní rozměry antény vychází z návrhového vzoru společnosti Texas Instruments s označením DN023. Naměřené parametry odpovídají očekávání, anténa se v pořadí se umístila jako čtvrtá. Naměřené RSSI bylo průměrně -103,7 dBm, SNR poté 5,9 dB. [39]



Obrázek 53 – Pátá testovaná interní anténa [39]

Poslední navrženou anténou je opět anténa leptaná přímo v motivu plošného spoje. Tento typ antény se označuje jako meandrující monopól, přesné rozměry byly převzaty z návrhového vzoru DN024 společnosti Texas Instruments. Hlavní výhodou leptaných antén je jejich nízká cena, nevýhodou poté značné rozměry v porovnání s anténami s keramickými prvky. V porovnání s ostatními návrhy se tato anténa poměrně těsně umístila na druhém místě, překonala tak původní očekávání. Naměřené hodnoty parametru RSSI byly průměrně -96,3 dBm, hodnota SNR přitom průměrně dosahovala 6,7 dB. [40]



Obrázek 54 – Šestá testovaná interní anténa [40]

Pro možné porovnání s externími anténami bylo provedeno měření i externí prutové antény. Anténa byla měřena za stejných podmínek jako v případě interních verzí, naměřené parametry byly průměrně 94,7 dBm v případě RSSI a 6,6 dB v případě SNR. Zajímavostí tak je, že třetí navržená interní anténa dosahovala mírně lepších hodnot. Rozdíl je však velmi malý a spíše, než samotnou anténou je způsoben neznámou změnou celého měřicího řetězce, nejpravděpodobněji změnou přenosového prostředí.



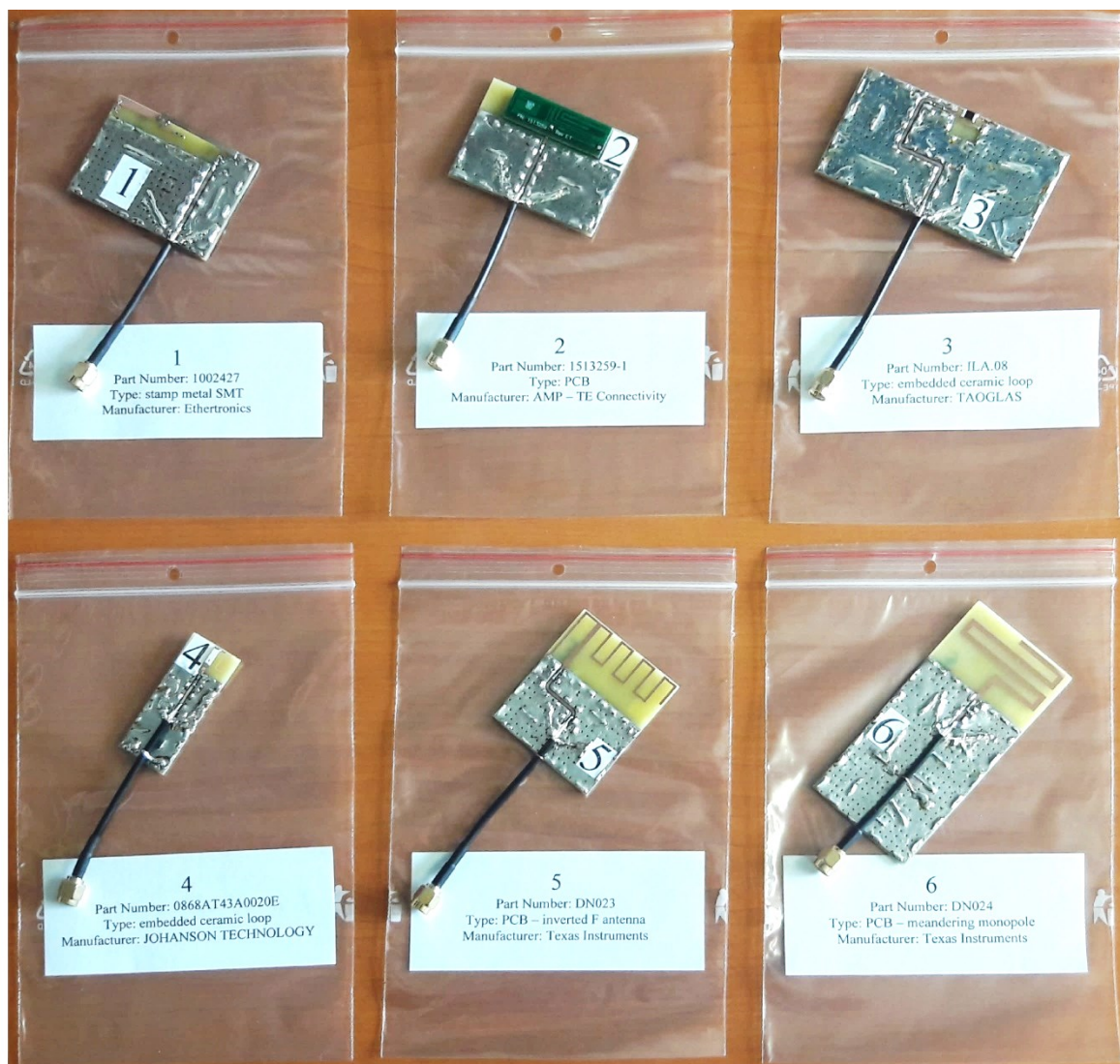
Obrázek 55 – Externí anténa testovaná pro porovnání s interními verzemi

Níže uvedená tabulka přehledně zobrazuje naměřené hodnoty a výsledné určené pořadí měřených interních antén. Poslední pozici v tabulce zabírají hodnoty naměřené při použití externí antény, jedná se tak o referenci pro porovnání s ostatními měřenými anténami.

Tabulka 2 – Porovnání naměřených hodnot testovaných antén

Anténa	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Pořadí
1 – Ethertronics 1002427	-108,2	4,3	5
2 – TE Connectivity 1513259-1	-99,7	5,5	3
3 – TAOGLAS ILA.08	-94,5	6,3	1
4 – JOHANSON TECHNOLOGY 0868AT43A0020E	-122,7	-1,3	6
5 – Texas Instruments DN023	-103,7	5,9	4
6 – Texas Instruments DN024	-96,3	6,7	2
Referenční	-94,7	6,6	-

Přes veškerou snahu o co možná nejpresnější a nejstálější měření nelze neměřené hodnoty považovat za hodnoty stanovené laboratorním měřením. Měření bylo provedeno za účelem zjištění nejvhodnější interní antény pro konkrétní zapojení v rámci sondy půdní vlhkosti. V jiných zapojeních se mohou navržené antény chovat jinak.



Obrázek 56 – Zkušební přípravy pro testování interních antén

6 Instalace a servis navržené půdní sondy

Způsob a kvalita provedené instalace sondy do půdy v dané lokalitě hraje zásadní roli pro správnou funkci navržených senzorů. Ideálním způsobem instalace je vložení sondy do předem vyvrtaného otvoru o průměru 50 mm. Sondu sice je možno instalovat i formou výkopu a následného zasypání, ale tento způsob je nejen značně náročnější a zdouhavější, současně také může snadno vést k nedokonalému kontaktu těla sondy s okolní půdou, a tedy k nesprávné funkci. Rovněž může při udusávání dojít k mechanickému poškození sondy nebo vnitřních senzorů, nehledě na množné poškození voděodolných spojů jednotlivých částí těla sondy. Současně je při zasypávání potřeba dodržovat původní skladbu jednotlivých vrstev půdy.

6.1 Vyrobený zemní vrták

Pro zjednodušení instalace bylo přistoupeno k vytvoření vlastního půdního vrtáku, který svým vnějším průměrem odpovídá průměru půdní sondy. Hrot vrtáku tvarově vychází z Edelmanova spirálovitého vrtáku, který se běžně používá k odběru porušených půdních vzorků. Zásadním rozdílem je část pro hromadění odvrtné zeminy, která oproti vzoru není otevřená. Takto upravený vrták má sice z důvodu ucpávání zhoršenou schopnost vrtání v případě mokré nebo přemokřené hlíny či jílu, nicméně umožňuje vyvrtání hladké díry bez narušení těsného okolí vrtu. Navržený vrták zároveň velmi dobře vytváří rovný vrt bez zahnutí, díky čemuž je následná instalace sondy velmi jednoduchá. [48]

Konstrukce vrtáku byla navržena a vytvořena i s ohledem na skladnost a snadnou přenositelnost, proto je složena z několika částí. Samotná vrtná hlava se stopkou je s rukojetí spojena pomocí takzvaného bajonetového spoje. Rukojeť je poté rozšířena vsunutím hranolu čtvercového průřezu.



Obrázek 57 – Detail bajonetového spoje vrtáku a rukojeti před nátěrem

Jelikož je při vrtání velmi obtížné dodržet kolmost vrtáku vůči zemi, bylo přistoupeno k vytvoření pomocné plošiny s vodící trubicou. Vrták je touto trubicou prostrčen a vůči základně plošiny kolmo veden. Ještě, než poslední část vrtné hlavy opustí tento vodící trubku je možné na stopku vrtáku nasadit navržený a vytištěný plastový vystředovací díl, který stopku vrtáku po zbytek doby vrtání udržuje na středu vodící trubky plošiny. Tímto je zaručena nejen kolmost horní části vrtu, ale i zbylé, hlubší části vrtaného otvoru.



Obrázek 58 – Vyrobený půdní vrták s pomocnou plošinou, zdroj: autor

6.2 Výměna baterie nebo úprava počtu a hloubky senzorů

Samozřejmým požadavkem na konstrukci sond jako takových je možnost servisu již instalovaných sond, a to zejména ze dvou důvodů. Nejčastějším důvodem je výměna vybité baterie za novou, neboť dle požadavku zákazníka nemusí být sondy vybaveny akumulátorem a fotovoltaickým panelem zajišťujícím nepřetržitý provoz. Druhým nejčastějším důvodem bývá požadavek na změnu počtu nebo hloubky umístění jednotlivých senzorů.

Přesný průběh servisního zásahu sice záleží na typu sondy (dle horního zakončení) a na počtu senzorů, obecně je ale postup velmi podobný. V každém případě je nejprve potřeba důkladně očistit okolí instalované sondy, například odstranit blízkou vzrostlou travu. Současně je potřeba očistit nadzemní část těla sondy, zejména horní část tak, aby při následném otevření těla sondy nedošlo ke vniku nečistot dovnitř trubky tvořící tělo sondy.

Postup otevření horního zakončení se odvíjí od způsobu, jakým byla sonda sestavena. Pokud byl k zatěsnění mezery mezi horní částí a trubicou použit silikon, je potřeba jej opatrně odstranit. Po odstranění je možné pomalými kývavými pohyby postupně horní zakončení nadzvedávat a sundat. V žádném případě ale není možné horní část otáčet, neboť by mohlo dojít k přetržení kabelů vedoucích k fotovoltaickému panelu, externí anténě nebo atmosférickým senzorům umístěných v horní části sondy. Jedinou výjimku tvoří jednoduché zakončení bez externí antény, fotovoltaického panelu a senzorů, kterým je možno pro snazší vysunutí otáčet.

Jakmile již není horní část s trubicou spojena, je potřeba ji opatrně zavěsit přes hranu trubky tak, aby nedošlo k poškození propojovacích kabelů. Nyní je možno vytáhnout elektroniku sondy pomocí háku zasunutého do připravených děr v horní části elektroniky. Alternativou je použití kleští, zde je ale potřeba klást důraz na zamezení poškození desky plošných spojů poškrábáním – možným řešením je obalení čelistí kleští gumovou lepicí páskou. Při vytahování elektroniky není doporučeno deskami plošných spojů otáčet, nebo by mohlo snadno dojít k popraskání pájených spojů nebo i samotných měděných cest.

V případě výměny baterií stačí elektroniku povytáhnout pouze tak, aby byla baterie snadno přístupná. Následná výměna je již velmi jednoduchá. V případě změny počtu nebo hloubky senzorů je potřeba vytáhnout celou elektroniku. V obou případech je vhodné se důkladně podívat po známkách zvýšené vlhkosti vzduchu uvnitř sondy, které je zpravidla způsobeno vniknutím vody dovnitř trubky. Řídicí jednotku je rovněž možno osadit vnitřním senzorem vlhkosti vzduchu, který vniknutí vody včas zaznamená, díky čemuž lze předejít korozi elektrod nebo i případnému zkratu v elektrických obvodech.

Pokud je elektronika nebo její části poškozena nadměrnou vlhkostí je doporučeno ji vyměnit. Současně s tím je potřeba zkontrolovat prázdné tělo sondy, zda se ve spodní části nenachází vniklá voda. V tomto případě je nutné trubku z půdy odstranit, vysušit a zkontrolovat vodotěsnost spodní části.

Opětovné vsunutí elektroniky dovnitř těla trubky je potřeba provést opatrně, neboť při nesprávné instalaci může dojít k deformaci měřicích elektrod senzorů, čímž by došlo k naměření nesprávných hodnot. Pro usnadnění je možné použít pomocný přípravek, sestávající ze dvou polovin podélně rozříznuté trubky, který při vkládání zajistí stlačení pružin elektrod a následně jejich snadné vložení dovnitř trubky.

Před úplným zasunutím elektroniky je potřeba zapojit případnou kabeláž vedoucí do horního krytu sondy. Následně je potřeba zapojit napájení elektroniky pomocí spojky kolíkové lišty. Zde je potřeba důrazně dbát na pořadí operací, zejména v případě použití externí antény a před zapnutím raději dvakrát zkontrolovat správné připojení konektoru antény. Pokud dojde k zapnutí řídicí jednotky bez připojené antény, může dojít k poškození nebo úplnému zničení koncového vysílacího prvku komunikačního modulu.

Teprve po plném zprovoznění sondy, tedy po kontrole komunikace a správnosti dat, je doporučeno elektroniku zcela zasunout a následně zakrytovat. V případě potřeby je možné spoj horního zakončení a samotné trubky utěsnit pomocí exteriérového silikonu.

7 Návrh a realizace řídicí jednotky závlahového systému s využitím bezdrátové technologie LoRa

I přes původní myšlenku o vytvoření systému umožňující pouze měření půdní vlhkosti bylo nakonec rozhodnuto vytvořit i zařízení schopné půdní vlhkosti ovlivnit. Proto bylo přistoupeno k vytvoření řídicí jednotky umožňující automatické ovládání závlahového systému.

7.1 Požadavky na řídicí člen závlahového systému

Základním krokem před samotným návrhem takového zařízení je stanovení požadavků a potřebných funkcí systému. Zcela zásadní je kompatibilita s navrženým systémem pro měření půdní vlhkosti, proto musí i řídicí jednotka závlahového systému podporovat komunikaci pomocí bezdrátové sítě LoRa, stejně tak jako pomocí drátového rozhraní RS485.

Jelikož se jedná o řídicí zařízení technologie, je vhodné umožnit kromě plně automatického módu i manuální mód, případně hybridní režim. Je tak zapotřebí vytvořit rozhraní mezi přístrojem a obsluhou. Pro signalizaci aktuálního stavu, nebo například aktuálně naměřených hodnot se jako nejvýhodnější jeví použití displeje. Klasické indikátory na bázi samostatných LED značně snižují intuitivnost takového systému a od lidské obsluhy zpravidla vyžadují dokonalou znalost daného zařízení.

Vzhledem k industriálnímu charakteru zařízení je žádoucí zvolit vhodnou krabičku, kryty i napájecí zdroj zařízení. Zde se jako nejvhodnější jeví použití krabiček umožňujících montáž na DIN lištu, neboť výsledný celek lze umístit do rozvaděče chránícího daná zařízení před nežádoucí manipulací nebo zásahy osob a současně i před atmosférickými vlivy nebo nežádoucím vlastnostem prostředí (například zvýšená prašnost).

Jelikož se v praxi používá mnoho typů ventilů s různým způsobem ovládání, je zapotřebí vytvořit, pokud možno univerzální ovládací výstupy. Kromě monostabilních ventilů (do výchozí polohy se vrací mechanicky bez potřeby elektrického napájení) je potřeba, aby navržený systém uměl ovládat i bistabilní ventily (otevření či zavření ventilu pomocí pulzů opačné polarity). Stejně tak je zapotřebí umět ovládat i další typy ventilů (astabilní – při odpojení řídicího signálu za chodu zůstanou v mezi-poloze) nebo různá jiná zapojení ventilů (například zvlášť aktivní vodič pro každou z poloh – otevřeno/zavřeno).

Aby bylo možné vyhodnotit objem vody použité k zalévání, je zapotřebí měřit průtok jednotlivých závlahových okruhů. Většina základních průtokoměrů disponuje pulzním výstupem, s rostoucím objemem protékané vody roste i frekvence pulzů na výstupu průtokoměru. Nejčastější konstrukce průtokoměrů zahrnuje Hallovu sondu, která pro svou funkci vyžaduje napájení. Tomu musí být přizpůsoben napájecí výstup řídicí jednotky závlahového systému, který musí být schopen potřebné napětí poskytnout – nejčastěji +5 V nebo +12 V.

7.2 Návrh systému

Co se týče hardwarové části elektroniky, řídicí jednotka závlahového systému je ve své podstatě velmi podobná řídicí jednotce samotné půdní sondy. Vzhledem k požadavku na komunikaci prostřednictvím bezdrátové sítě LoRa a drátové sběrnice RS485 se předpokládá použití stejných

základních součástí (mikrokontrolér, LoRa modul, rozhraní RS485). Zapojení je ale potřeba doplnit o uživatelské rozhraní, tedy o displej či jiné indikátory a ovládací prvky (tlačítka, spínače).

O zobrazení informací o aktuálním stavu zařízení se stará OLED displej. Vybrána byla totožná zobrazovací jednotka jako v případě vývojového a kalibračního zařízení, neboť právě tento grafický displej představuje optimální kompromis mezi velikostí, spotřebou, rozlišením a cenou. Použití displeje oproti klasickým LED indikátorům zároveň přináší možnost jednoduššího a přehlednějšího nastavování a ovládání navrhovaného závlahového systému.

Zapojení modulu komunikace LoRa, stejně tak jako kontroléru sběrnice RS485 vychází z předchozích vytvořených zapojení řídicí jednotky sondy půdní vlhkosti. Rovněž bylo převzato i zapojení antény, je tedy možné si zvolit buďto interní nebo externí anténu.

Důležitou součástí zařízení je externí krystal o nominální frekvenci 32 768 Hz, který slouží jako časová základna pro měření uplynutého času. Ten je potřeba měřit nejen kvůli periodickému odesílání zpráv, ale také pro časování délky zapnutí jednotlivých čerpadel a ventilů závlahového systému.

Řídicí jednotka byla rovněž vybavena konektorem pro připojení různých senzorů, například pro měření teploty, vlhkosti nebo atmosférického tlaku. Naměřené hodnoty je následně možné odeslat pomocí sítě LoRa, díky čemuž lze dálkově monitorovat vnitřek krabičky, případně i blízké okolí řídicí jednotky.

Hlavní napájecí napětí jednotky může být dle potřeby různé, v rozmezí od 6,5 V až po 32 V. Zvolenému napájecímu napětí však musí být uzpůsobeny použité relé. Testovaná řídicí jednotka byla osazena relé s nominálním napětím cívky o hodnotě 12 V, proto byl použit napájecí zdroj se stejným výstupním napětím.

7.2.1 Rozložení konektorů

Veškerá elektronika byla vyvíjena se záměrem konečného umístění do 9poziční krabičky na DIN lištu. Z důvodu snadné montáže i případného následného servisu byly pro připojení vodičů vybrány rozpojitelné šroubovací svorkovnice rozteče 5 mm. Krabička je tak osazena celkem šesti 9pinovými konektory. V případě potřeby výměny řídicí jednotky tak není díky rozpojitelným svorkovnicím nutné odpojovat jednotlivé vodiče zvlášť, ale stačí pouze vysunout konektorové celky, navíc bez použití jakéhokoli nářadí.

Zvolením fyzických rozměrů krabičky a příslušných konektorů byl jednoznačně stanoven maximální počet dostupných vývodů na hodnotu 54 pinů. Ve smyslu co možná největší univerzality výsledného zařízení bylo rozhodnuto o periferiích následovně: 2 samostatné nezávislé okruhy čerpadel, každý navíc vybaven 2 plovákovými snímači výšky vodní hladiny, dále celkem 3 nezávisle spínané okruhy ventilů a současně také 3 vyhrazené okruhy pro připojení průtokoměrů. K řízení ventilů byly vybrány výkonové relé LEG-12F, které jsou schopny spínat odporovou zátěž až do výše 15 A, a to i při napájení zátěže střídavým napětím velikosti 240 V. Totožné relé byly vybrány i pro ovládání čerpadel. Předem vyhrazené piny konektorů je v případě potřeby možné použít i k jinému než původnímu účelu. Lze tak například vytvořit jednotku s možností nezávislého řízení až 8 čerpadel nebo například jednotku řídicí až 8 nezávisle ovládaných monostabilních ventilů. [46]

Piny pro připojení hlavního napájení řídicí jednotky byly duplikovány, stejně tak i piny pro připojení sběrnice RS485. Tímto je možné zařízení sběrnice jednoduše řetězit bez potřeby vzájemného spojování vodičů v rámci jediného konektoru.

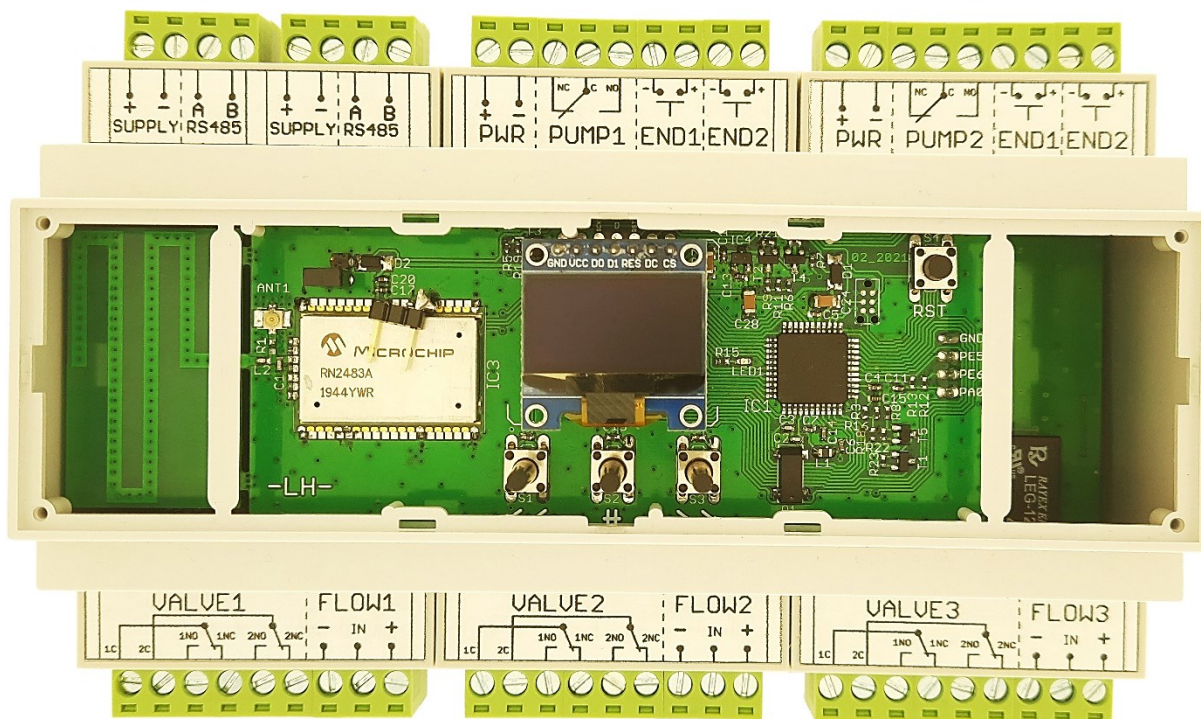
Konkrétní rozložení pinů lze nejlépe zobrazit na již kompletním zařízení (viz obrázek 59). Vlevo nahoře jsou k dispozici dva samostatné celky, které slouží pro připojení hlavního napájení a sběrnice

RS485. Oba 4pinové konektory jsou vnitřně vzájemně propojeny. Nahoře vprostřed je vidět zapojení konektoru pro připojení čerpadla. První dva piny zleva slouží jako vývod hlavního napájení řídicí jednotky pro případ potřeby. Další tři piny již slouží ke spínání samotného čerpadla. K dispozici je jak spínací (NO), tak i rozepínací (NC) kontakt. Následující piny v pořadí jsou určeny k připojení koncových spínačů, zde primárně určených pro detekci výšky vodní hladiny. Koncové spínače mohou pracovat jak ve spínacím, tak i rozepínacím režimu. Nejčastějším řešením měření výšky vodní hladiny je použití plovákových snímačů, které ke své funkci nevyžadují aktivní napájení.

9pinový konektor vpravo nahoře je rozložením pinů identický s předchozím, spínací i senzorové okruhy byly v zapojení duplikovány a jsou ovládány a snímány nezávisle na předchozím konektoru.

Obdobná je i situace v případě spodních konektorů, které jsou rovněž svým rozložením identické, ale jejich ovládání je vzájemně nezávislé. V levé části každého spodního 9pinového konektoru se nachází 6 pinů určených pro ovládání ventilů. Jedná se o vývody dvou relé s přepínacím kontaktem, každé relé je přitom možno ovládat samostatně. Díky této konfiguraci je možné k řídicí jednotce připojit různé typy ventilů, nejen nejčastější monostabilní, ale také bistabilní či astabilní.

Zbylé tři piny spodních konektorů jsou vyhrazeny pro připojení průtokoměrů. Kromě nulového potenciálu a vstupního pinu čítače impulzů je vyvedeno i napájení, jehož velikost si lze zvolit pomocí propojky kolíkové lišty – buďto stabilizovaných +5 V nebo hlavní napájecí napětí jednotky. Vzhledem k nedostatku vstupních čítačových pinů mikrokontroléru jsou pulzní výstupy jednotlivých průtokoměrů postupně přepínány a připojovány na jediný čítačový vstup. Toto řešení sice neumožňuje současné měření průtoku všech tří průtokových senzorů, nicméně vzhledem k předpokládané době provádění závlahy jednotlivých okruhů (minimálně desítky sekund) je možné průtok měřit postupně, například v sekundových intervalech, a výsledný objem použité vody poté následně dopočítat.



Obrázek 59 – Výsledná podoba řídicí jednotky závlahového systému

7.2.2 Záložní napájení

U zavlažovacího systému se nepředpokládá využití celoplošného záložního zdroje při výpadku hlavního napájení (nicméně to možné je), například v důsledku atmosférických jevů. Přesto se jeví jako vhodné samotnou řídicí jednotku záložním zdrojem vybavit. Výhodou takového řešení je, že jednotka samotná je schopna o výpadku hlavního napájení podat zprávu prostřednictvím bezdrátové sítě LoRa.

Tím je možné správce systému upozornit na možné problémy, například na vybavení jističe či jiné přepěťové nebo zkratové ochrany. Modelovým příkladem mohou být sady či skleníky, které fungují pouze s minimální lidskou obsluhou. U nich by se na tento problém mohlo přijít až o mnoho dní později, během kterých by již mohlo dojít k uschnutí některých rostlin, případně celkovému poškození a následnému snížení úrody.

Další výhodou může být zabránění ztráty dosavadně naměřených dat, například objemu již použité vody pro závlahu nebo délku časového intervalu provádění závlahy. Rovněž je možno informovat o poslední známé poloze bistabilních ventilů – při výpadku hlavního napájení není možno jejich stav změnit. V případě použití gravitační závlahy to s sebou nese riziko, kdy po výpadku hlavního napájení nedojde k uzavření ventilů a hrozí tak přemokření daného zavlažovaného pozemku.

Vzhledem k velmi nízké spotřebě při aktivování úsporného režimu řídicí jednotky je možné na jednu nenabíjecí lithiovou baterii typu CR123A o nominálním napětí 3 V zaslat jednotky až desítky tisíc zpráv (dle potřebného vysílacího výkonu a délky zpráv), což pro požadované účely bohatě dostačuje. Navíc, většina výrobců u tohoto typu baterie garantuje životnost >10 let, přičemž samovybití nepřesahuje 1 % kapacity za rok. Tyto vlastnosti dané baterie tak umožňují bezúdržbový provoz zařízení prakticky celou dobu jeho plánované životnosti. [41]

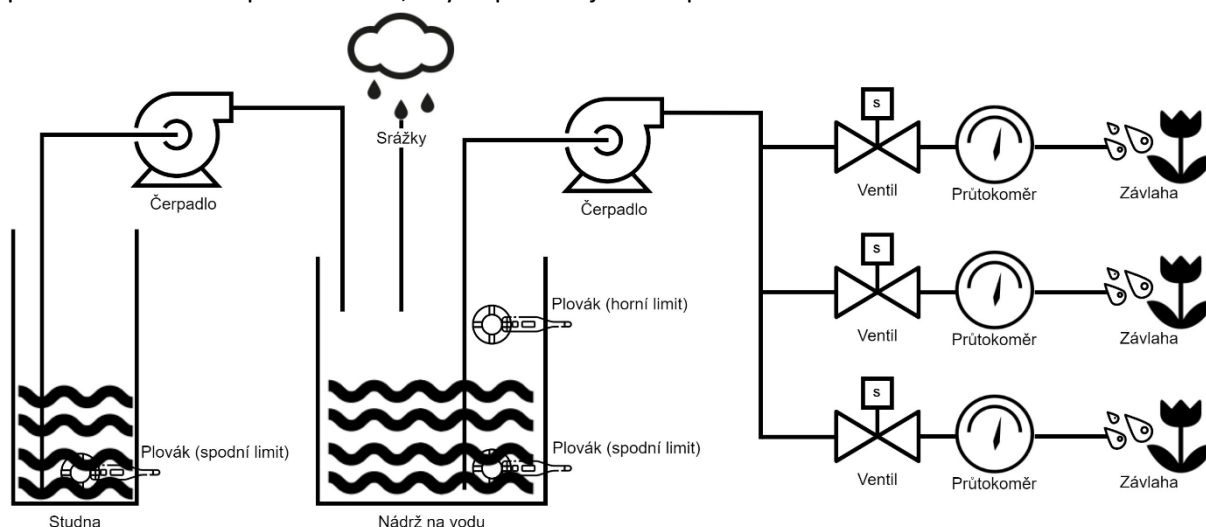
Při návrhu zařízení byly zvažovány i jiné možnosti záložního napájení. Například LiFePO_4 akumulátor nebyl použit, neboť se nepředpokládá dlouhodobý chod řídicí jednotky na záložní napájení, tedy se ani nepředpokládá nutnost použití vysokokapacitního či nabíjecího záložního zdroje. Dokonce není ani potřeba, aby byl záložní zdroj schopen dodávat velké množství proudu po delší dobu, neboť odběr proudu ani ve špičce (při aktivním vysílání a zapnutém displeji) nepřesahuje 100 mA. Hlavní výhody tohoto typu akumulátoru by se tedy neprojevíly a neopodstatnily by tak jeho vyšší cenu a další spojené náklady (zejména potřebný nabíjecí a ochranný obvod).

Další hojně používaný typ akumulátoru Li-Ion (LiCoO_2) by při uvažovaném použití rychle degradoval a pro tento typ aplikace je zcela nevhodný. Degradace by byla dále umocněna neustálým dobíjením na maximum kapacity. Ani použití specializovaných nabíječů schopných udržování kapacity akumulátoru například pouze na 80 % nezaručuje životnost po dobu delší pěti let. Dalším argumentem pro použití baterie namísto akumulátoru je absence nabíjecího obvodu, což snižuje cenu a zvyšuje spolehlivost. Rovněž je tím vyloučeno vytváření odpadního tepla uvnitř krabičky vznikajícího při případném nabíjení akumulátoru. Klasické nenabíjecí baterie jsou navíc považovány za bezpečnější a nebývají náchylné na změny teplot. V neposlední řadě je také možné použít méně výkonný hlavní napájecí zdroj (odečtení proudové kapacity pro nabíjení akumulátoru), čímž se opět sníží pořizovací náklady celého systému.

7.3 Příklad topologie a funkce závlahového systému

Jelikož je řídicí jednotka do značné míry univerzální, je možné topologii celého závlahového systému koncipovat různě. Pro účely vývoje a testování však byla vytvořeno a vyzkoušeno takové zapojení závlahového systému, které navrženou řídicí jednotku využívá co možná nejvíce, a přitom dobře demonstruje schopnosti a funkce.

Zdrojem vody pro závlahu je primárně dešťová voda, která je sbírána a svedena do centrální nádrže – předpokladem je odstranění hrubých nečistot, například listů. V případě nedostatku vody v nádrži je sepnuto čerpadlo, které do nádrže přečerpá vodu ze studny. V průběhu této operace jsou zároveň neustále hlídány výstupy snímačů vodní hladiny, které mohou čerpání zastavit – buďto v důsledku nedostatku vody ve studni nebo v případě naplnění nádrže. Třetím důvodem k zastavení odběru vody ze studny může být uplynutí časového limitu, neboť lze řídicí jednotce sdělit i maximální povolenou dobu čerpání v situaci, kdy nepotřebujeme naplnit celou nádrž.



Obrázek 60 – Příklad topologie závlahového systému

Samotný závlahový systém může využívat i gravitační metodu bez použití čerpadel, ta ale zde z důvodu jednoduchosti nebyla podrobně popisována. Popsaný demonstrační případ pro závlahu využívá zvláštní čerpadlo, které je spínáno pouze v případě potřeby provedení závlahy.

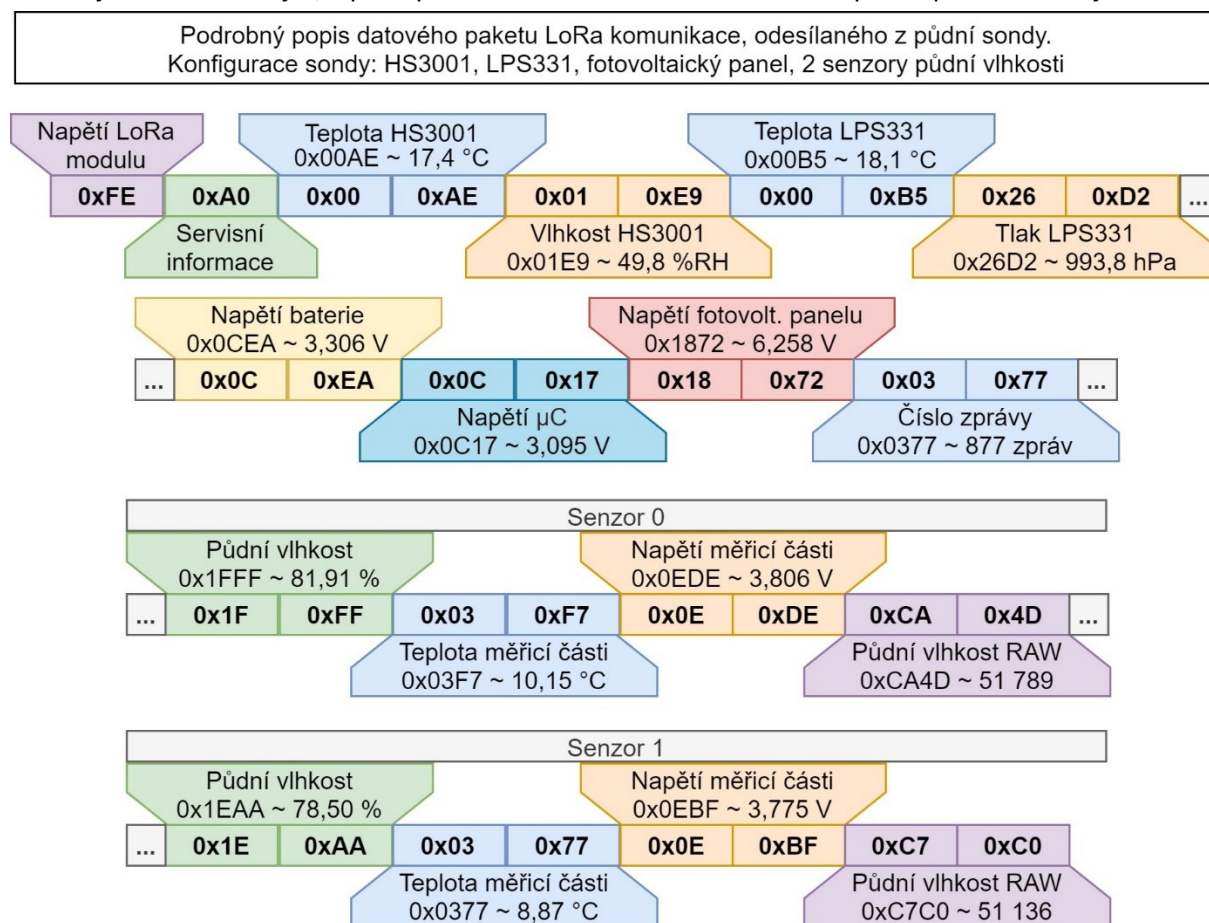
Po přijetí příkazu k závlaze a kontrole dostatku vody v závlahové nádrži je ventil daného okruhu otevřen a následně je spuštěno čerpadlo. V této fázi je průtokoměrem neustále hlídáno množství protékající vody, v případě nedekování dostatečného průtoku je celá operace zastavena a dojde k vypnutí čerpadla a uzavření ventilu. Následuje odeslání zprávy, ve které je uveden důvod chyby a naměřené hodnoty průtoku a doby trvání závlahy. Tímto chováním je možné například předejít poškození čerpadla z důvodu nedostatku vody v nádrži v situaci, kdy došlo k chybě plovákového snímače výšky vodní hladiny vyhodnocujícího spodní limit výšky hladiny vody v závlahové nádrži. Stejně tak lze tímto postupem detekovat rozpojení hadice vedoucí závlahovou vodu v libovolném úseku od nádrže až po samotný průtokoměr. V případě bezproblémového průběhu je závlaha ukončena buďto udanou délkou potřebného trvání závlahy nebo dosažením nastaveného limitu použitého objemu vody – i v tomto případě je ale vždy aktivní časový limit udávající maximální dobu trvání závlahy. Po ukončení zavlažovacího cyklu je řídicí jednotkou odeslána zpráva obsahující dostupné informace o průběhu závlahy. Byť je teoreticky možné k ukončení provádění závlahy použít i informace

o dosažení požadované půdní vlhkosti, v praxi je toto řešení zcela nevhodné, neboť se půdní vlhkost ve větších hloubkách mění pouze velmi pomalu a snadno by tak mohlo dojít k přemokření nebo úplnému zaplavení dané zavlažované lokality. Ukončení závlahy a obecně libovolný stav celého automatického systému je možné kdykoli manuálně změnit, buďto přímo pomocí tlačítek na řídicí jednotce závlahy nebo pomocí komunikace přes síť LoRa nebo přes sběrnici RS485.

8 Přenos, ukládání a vizualizace naměřených dat

V současné době existuje nepřeberné množství různých nástrojů umožňujících ukládání, zpracování i vizualizaci naměřených dat. Jelikož je zpravidla každý nástroj vhodný k mírně odlišnému způsobu použití, nelze navrhnout a aplikovat jeden jediný správný postup k řešení více značně odlišných úkolů. Stejně tak existuje mnoho způsobů, jak data ukládat a zpracovávat. V rámci této práce byl kladen důraz na využití bezplatných nástrojů, které ale i tak svými možnostmi zpravidla daleko přesahují potřeby. Jelikož je do budoucna předpokládáno další rozšiřování funkcionalit použitých zařízení, společně s tím jistě porostou i nároky na jednotlivé části řetězce zpracovávajícího naměřené hodnoty. Nicméně i proto byly zvoleny nástroje, které zpravidla nevyžadují hluboké znalosti daného tématu a které je možno snadno a rychle překonfigurovat právě ve smyslu potřebných budoucích úprav.

Množství a pořadí bajtů odesílaných sondou půdní vlhkosti závisí na její přesné konfiguraci. Na obrázku 61 je uvedena struktura dat sondy s touto konfigurací: HS3001 (teplota a vlhkost vzduchu), LPS331 (teplota a tlak vzduchu), fotovoltaický panel, 2 senzory půdní vlhkosti. Paket obsahuje řadu v reálném nasazení nepotřebných dat (například napětí měřicí části), neboť se jedná o paket z testovacího zkušebního provozu, kdy bylo zapotřebí sledovat co možná nejvíce parametrů. Zpráva obsahuje celkem 34 bajtů, v praxi potřebné informace však lze odeslat pouze pomocí 18 bajtů.



Obrázek 61 – Popis datového paketu LoRa komunikace, odesílaného z půdní sondy

8.1 LoRa brána

Pro testování navržených zařízení bylo využito komunity The Things Network, která provozuje bezplatnou síť LoRa. Komunitu je možno rozšířit použitím vlastního hardwaru, zejména bran (*gateway*), které zprostředkovávají přenos dat v rámci sítě LoRa a jejich odesílání do internetu, respektive na server komunity. Pokud je daná lokalita již pokryta bránou jiného člena komunity, je možné ji bezplatně využít, samozřejmě je ale potřeba dodržovat základní pravidla. Zde patří snaha o co nejmenší počet zpráv a jejich velikost, navíc není dovoleno využít zpětné potvrzovací zprávy s výjimkou testování daného zařízení. Tyto podmínky jsou v rámci navrženého zařízení splněny, je tak možné senzory provozovat s jakýmkoli veřejnými bránami komunity.

Vzhledem k nedostatečnému pokrytí testované lokality byla využita vlastní brána, zapůjčena katedrou kybernetiky a biomedicínského inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava. Brána je založena na jednodeskovém počítači Raspberry verze 3B, doplněném o desku iC880a, která zajišťuje komunikaci prostřednictvím bezdrátové sítě LoRa. Sestava je samozřejmě doplněna o vhodnou anténu pro pásmo 868 MHz.

Velkou nevýhodou komunity The Things Network je neukládání posílaných dat. Naměřené hodnoty je tedy zapotřebí ukládat na jiném místě. Pro potřeby tohoto projektu se ukázalo jako dostatečné úložiště v lokální síti. Úložiště je realizováno na počítači Raspberry 3B+, který je na server komunity připojen pomocí protokolu MQTT. Server The Things Network slouží jako MQTT broker, má tedy na starost jednotlivá připojená zařízení a přeposílá zprávy ze senzorů směrem do databáze.



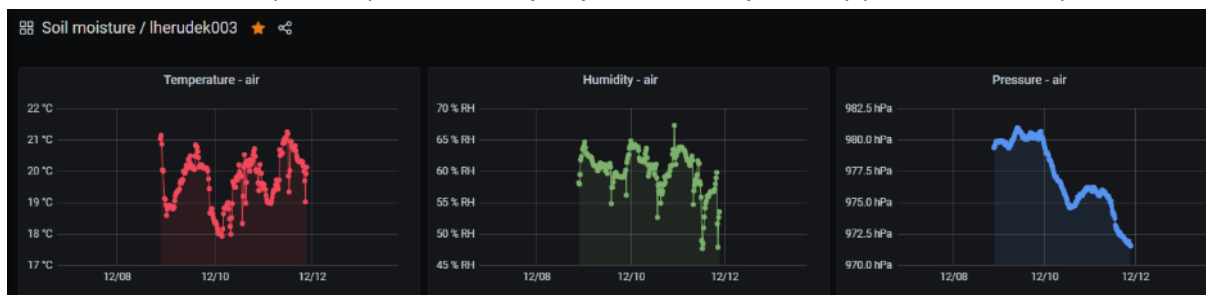
Obrázek 62 – Brána umožňující připojení senzorů do sítě LoRa

8.2 Databáze

Ukládání dat v místním úložišti je řešeno pomocí databáze InfluxDB. Jedná se o open-source databázi přímo určenou pro ukládání dat ze senzorů založených na koncepci internetu věcí. Každá uložená množina hodnot je opatřena časovou značkou, díky které je následné vyhledávání v databázi jednoduché a velmi rychlé. Přístup do databáze je možný pomocí příkazů založených na jazyku SQL, což značně zjednodušuje případné databázové dotazy, neboť tento jazyk je hojně využíván a má dobrou uživatelskou základnu. Databázový server naslouchá na portu 8086. Jedná se o relativně novou záležitost (vydání verze 2.0 proběhlo v roce 2019), databáze InfluxDB je neustále vylepšována, a navíc je obecně velmi dobře podporována napříč dalšími službami. Napojení databáze například na vizualizační prostředky bývá relativně jednoduchou a rychlou záležitostí, dobrým příkladem je vizualizační nástroj Grafana. [42]

8.3 Vizualizace dat

Nástrojů pro vizualizaci, stejně tak jako pro zpracování dat, existuje nepřeberné množství. Při výběru byl kladen důraz na jednoduchost natavení, stejně tak jako potřeba bezplatného nástroje schopného plně fungovat v rámci lokální sítě i bez přístupu k internetu. Vzhledem k předchozím zkušenostem byl vybrán nástroj Grafana. Jedná se o multiplatformní interaktivní vizualizační nástroj. Hlavními prvky jsou obvykle grafy, které je možno pomocí SQL syntaxe přímo napojit na konkrétní databázi (zde je použita zmíněná InfluxDB). Jedná se přitom o plnohodnotně interaktivní grafy, kdy je možno zobrazovat různá časová období nebo například přibližovat vymezené časové úseky. Samozřejmostí je podpora fyzikálních jednotek u zobrazených naměřených hodnot, čímž samotná vizualizace získává na přehlednosti. K dispozici jsou i další vizualizační prvky, například jednoduché ukazatele nebo tabulky. Přístup na server zajišťující vizualizaci je možný prostřednictvím portu 3000.



Obrázek 63 – Ukázka části vizualizace naměřených dat pomocí nástroje Grafana

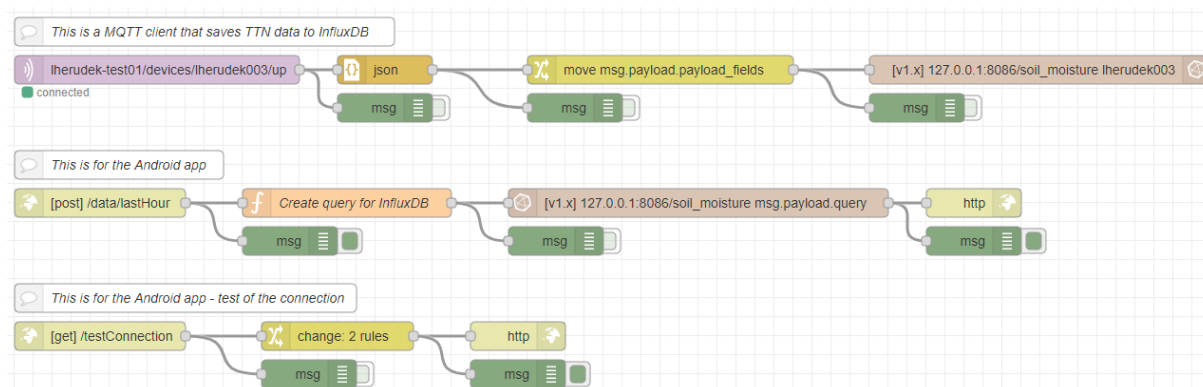
8.4 Vzájemné provázání použitých modulů řetězce zpracování dat

První pokusy o ukládání dat proběhly za pomoci MQTT klienta (*subscriber*) MosquittoMQTT, společně s MySQL databází (resp. MariaDB). Jejich běh byl zajištěn pomocí RaspberryPi, propojení bylo vytvořeno jednoduchým Bash skriptem. Další pokus využíval aplikačního serveru ve spojení s jazykem PHP, ale i zde vyvstal problém s poměrně komplikovanou úpravou a implementací potřebných funkcí.

K propojení jednotlivých dílčích součástí bylo nakonec využito nástroje Node-RED. Jedná se o nástroj umožňující grafické programování pomocí spojování různých funkčních bloků. Bloky jsou přitom založeny na jazyce JavaScript, s tím se ale běžný uživatel nemusí vůbec setkat. Velkou výhodou je přehlednost výsledného programu, stejně tak i rychlé navržení nebo upravení požadovaného algoritmu. Programování je prováděno prostřednictvím klasického webového prohlížeče, veškeré

služby nástroje Node-RED mohou být uloženy na vlastním serveru umístěném v lokální síti. Není tak potřeba se spoléhat na služby dalších stran a fungování naprogramovaných funkcí je v rámci lokální sítě zaručeno i bez přístupu k internetu. Přístup na server ke grafickému editoru je možný prostřednictvím portu 1880.

Na obrázku 64 je zobrazen program MQTT klienta pro uložení dat do databáze, níže se nachází vyčtení a odeslání dat pomocí HTTP požadavku, který je použit navrženou aplikací pro OS Android.



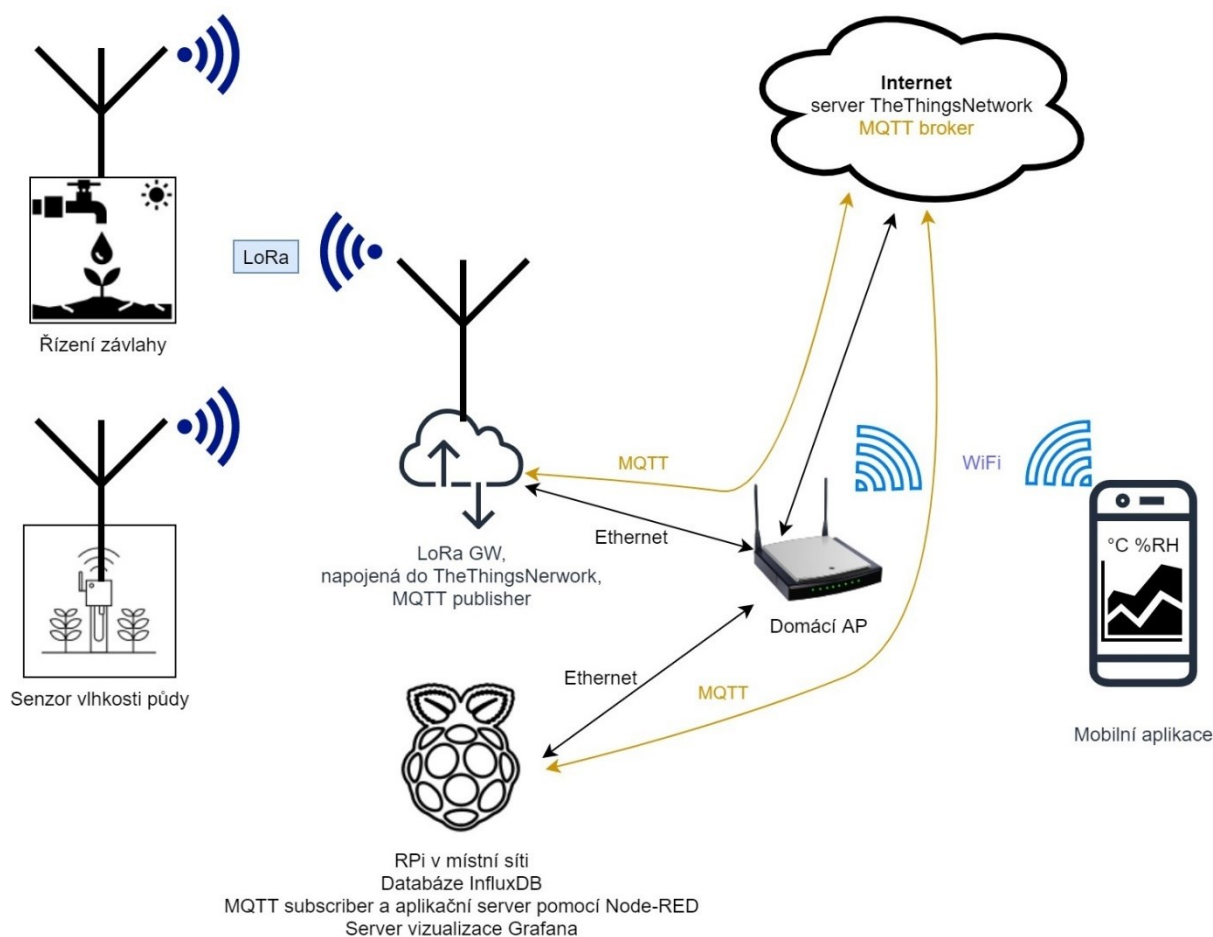
Obrázek 64 – Ukázka programu nástroje Node-RED

8.5 Navržená topologie systému

Výsledná navržená a odzkoušená topologie je graficky znázorněna na obrázku 65. Zpracování a ukládání dat, včetně vizualizace, probíhá na vlastním serveru, tvořeném jednodeskovým počítačem RaspberryPi 3B+ a umístěném v lokální síti. Tento počítač byl zvolen z řady důvodů, zejména z dobrého poměru pořizovací ceny vůči dostupnému výpočetnímu výkonu. Současně pro tento počítač existuje řada návodů a příkladů použitých programů a funkcionalit. Výhodou je rovněž nízká spotřeba elektrické energie a s tím spojené nízké provozní náklady.

V případě potřeby je možné buďto server zviditelnit pro umožnění přístupu zvenčí nebo celý softwarový balík serveru přesunout na cloudové úložiště přímo přístupné z internetu. Použité programy a části systému jsou obecně napříč komerčními servery dobře podporovány, díky čemuž by měla být změna serveru vcelku bezproblémovou záležitostí s potřebou pouze minimálních zásahů do současného systému.

Brána síť LoRa nemusí být umístěna v lokální síti, neboť je k MQTT brokeru komunity The Things Network připojena prostřednictvím sítě internet. Využít je možné jakékoli veřejné brány dané komunity, jediným předpokladem je dostatečné pokrytí dané oblasti signálem sítě LoRa.

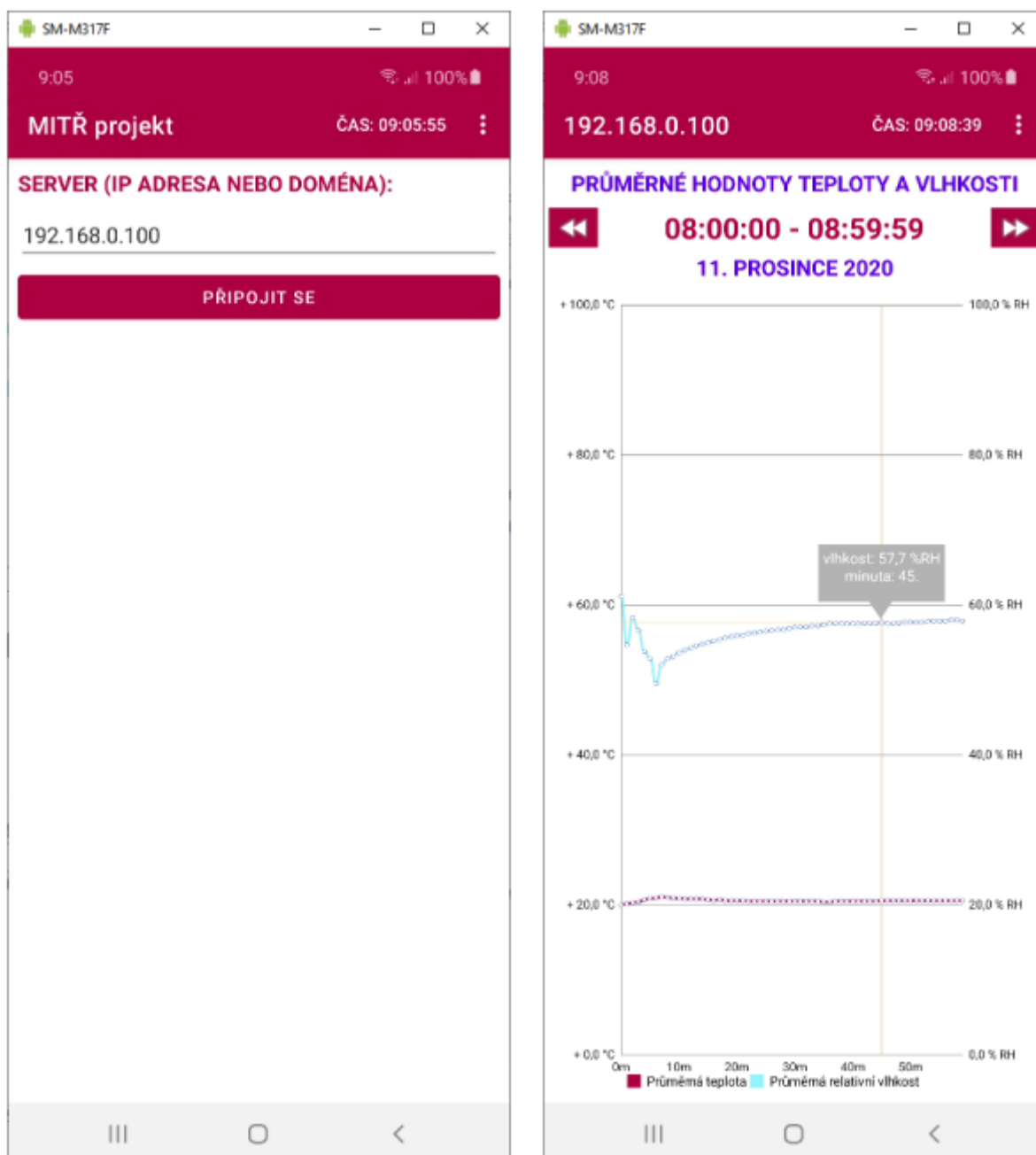


Obrázek 65 – Navržená topologie měřicího a řídicího systému

8.6 Aplikace pro OS Android

Z důvodu možné rychlejší kontroly funkčnosti senzorů při instalaci i následné správě byla vytvořena jednoduchá aplikace pro zařízení s operačním systémem Android. Samotný program se skládá ze dvou základních aktivit. První aktivita umožňuje nastavení adresy databázového serveru, druhá aktivita poté získává a zobrazuje data naměřená jednotlivými sondami (například teplota a vlhkost vzduchu). Data z databáze jsou přijata jako hodnoty s časovým razítkem ve formátu JSON, jejich další zpracování v rámci aplikace je tedy poměrně jednoduché.

Při psaní programu byla snaha umístit co nejvíce uživatelských řetězců do souboru *strings.xml*, jejich úprava nebo případné přeložení aplikace například do angličtiny by nemělo představovat zásadní problém.



Obrázek 66 – Počáteční obrazovka a obrazovka s grafem aplikace pro OS Android

Vytvořenou aplikaci by bylo vhodné dále rozšířit, zejména o možnost vzdálené konfigurace jednotlivých půdních sond pomocí sítě LoRa. Dalším možným rozšířením je vytvoření vyhrazené obrazovky pro ovládání a kontrolu zavlažování.

9 Testování navržených sond a využití naměřených dat

Posledním, ale v podstatě nejdůležitějším krokem práce je interpretace dat získaných reálným měřením. Data byla přerušovaně sbírána v období jednoho roku – od května 2020 do dubna 2021, přičemž hlavní sběr dat proběhl ve dvou obdobích (léto 2020 a jaro 2021). Ve zbylém čase docházelo pouze ke krátkým měřeným intervalům, zejména za účelem ověření funkčnosti prováděných modifikací na těle sondy (zkoušení různých koncovek z 3D tisku) a hlavně na elektronice uvnitř (různé konfigurace senzorů a zkouška různých antén). Tato zkušební měření jsou z hlediska nasbíraných dat bez většího významu.

9.1 Zkušební provoz samostatné sondy umístěné v půdě

Toto měření mělo za úkol vyzkoušet několikadenní provoz sondy bez jakéhokoli zásahu ze strany obsluhy. Vyzkoušena byla nejen výdrž baterie, ale i voděodolnost navrženého spodního dílů zakončení sondy vyrobeného pomocí 3D tisku.

Aby bylo možné získat kvalitní nezkrácená data, bylo potřeba vytvořit přípravek zajišťující dlouhodobě stabilní podmínky měření. Nejjednodušším řešením je umístění sondy půdní vlhkosti do plastového kbelíku naplněného zeminou. Do kbelíku byly v jeho dně vyvrtány díry pro odvod případné přebytečné vody v případě přemokření půdy v celém objemu. Testovací přípravek byl umístěn do sklepních prostor, kde nízká teplota společně s vyšší vzdušnou vlhkostí zabraňují rychlému vysychání povrchu zeminy. Díky tomu je možné sledovat stabilitu měření, neboť půdní vlhkost by se měla dle předpokladů snižovat pouze velmi pomalu.

Testovaná sonda byla zkoušena v konfiguraci se dvěma senzory verze 1.1, umístěnými do úrovně 5, respektive 15 cm pod povrchem půdy. Ovládaní senzorů a odesílání naměřených dat obstarávala řídicí jednotka verze 1.0. Použita byla externí prutová anténa určená pro pásmo 868 MHz. Vzhledem k blízkosti brány sítě LoRa (cca 30 metrů skrze 4 stěny) však nebyl výběr správné antény kritický a dobře posloužila i ta prakticky nejlevnější dostupná.

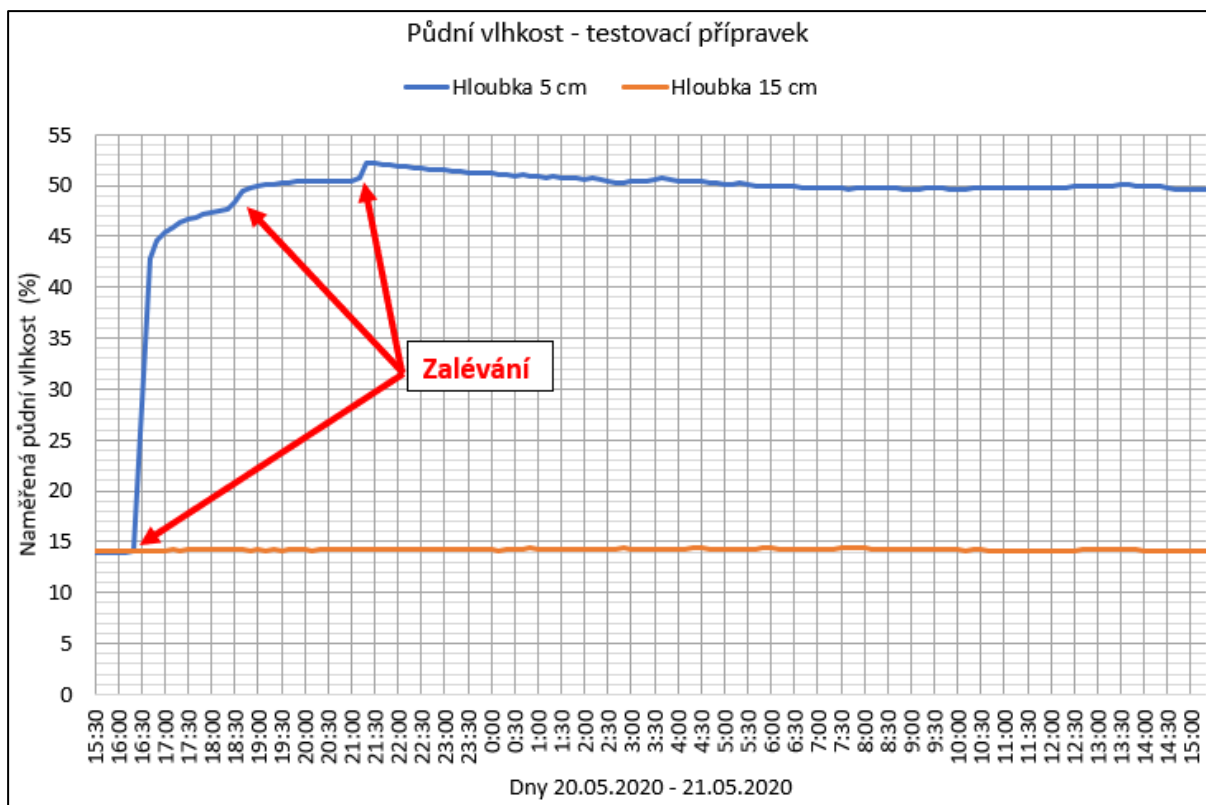
Jako zdroj energie byl zvolen akumulátor velikosti 18650 s chemickým složením LiFePO_4 o nominální kapacitě 1 000 mAh. Vzhledem k nenáročnosti testu z hlediska přírodních podmínek bylo možné použít i jiné napájecí zdroje, nicméně právě zmíněný akumulátor již byl pro své přednosti oproti jiným předem vybrán i pro budoucí testy a předpokládané reálné využití sond půdní vlhkosti. Tato zkouška tak měla mimo jiné potvrdit či vyvrátit správnost volby. I přesto, že sonda v použité konfiguraci již umožňovala připojení jak externího zdroje, tak i fotovoltaického panelu, nebyly v tomto testu použity.

Plastová trubka tvořící tělo sondy byla záměrně zkrácena pro snazší přístup k elektronice sondy, neboť v průběhu zkušebního provozu byly opakovaně měřeny jednotlivé části, zejména pak napětí baterie, výstupní napětí zvyšujícího měniče a velikost napájecího napětí měřicí části vrchního senzoru.



Obrázek 67 – Zkušební provoz sondy umístěné v přípravku se zemínou

V průběhu testu, od 19.5.2020 do 26.5.2020, bylo úspěšně přeneseno 10 212 zpráv. Akumulátor byl opakovaně dobíjen mimo sondu celkem čtyřikrát, vždy přibližně po odeslání 2 000 zpráv. Program senzorů a řídicí jednotky sice byl před provedením testování částečně optimalizován ve smyslu zajištění nižší spotřeby elektrické energie, zajisté by ale bylo možno jak program, tak i elektroniku, dále vylepšovat a navýšit tak počet odeslaných zpráv na jedno nabití akumulátoru. Časování jednotlivých sekvencí programu bylo voleno velmi konzervativně tak, aby bylo možné odzkoušet dlouhodobou funkčnost sondy bez problémů, které by mohly vzniknout přísnějším časováním. Například bylo pomocí osciloskopu zjištěno, že doba měření jednoho senzoru zpravidla trvá okolo 160 ms, program řídicí jednotky ale vyčkal raději 300 ms, než podal pokyn k měření druhému senzoru. Úprava časování tak očividně přináší velké možnosti v úspoře energie, nicméně samotná optimalizace je velmi náročná, zejména z hlediska potřebného testování v reálném prostředí.



Obrázek 68 – Naměřené hodnoty půdní vlhkosti při prvním zkušebním provozu

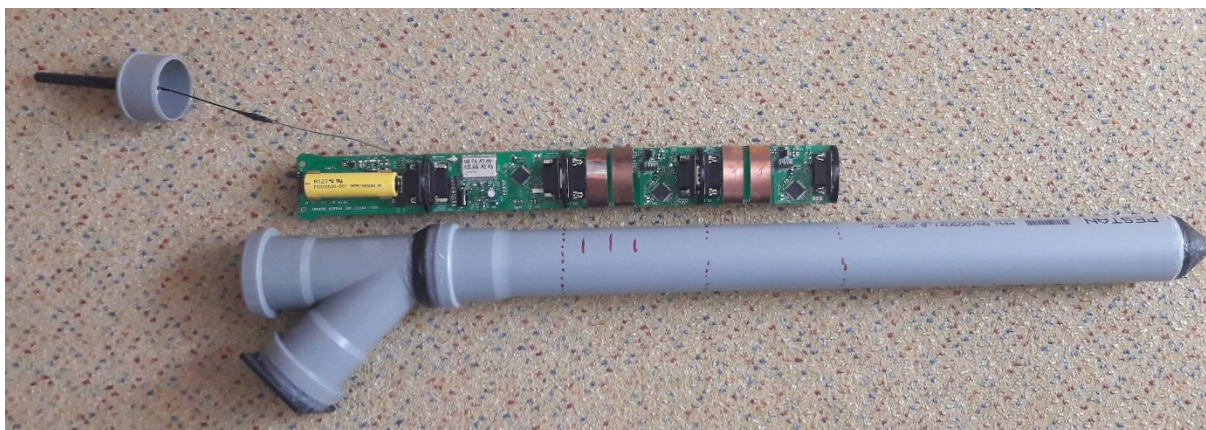
U testovacího přípravku došlo k nalití 300 ml vody do nádoby o objemu zeminy 10 l v čase 16:23 dne 20.05.2020. V 18:23 téhož dne bylo zalití opakováno množstvím 100 ml, stejně tak ještě ve 21:00. Tím bylo dosaženo absolutního nasycení půdy v horní části přípravku. Je to ostatně velmi dobře patrné z výše uvedeného obrázku. Zatímco senzor umístěný cca 5 cm pod povrchem reagoval na zvýšení vlhkosti prakticky okamžitě, senzor v hloubce 15 cm zvýšenou vlhkost půdy vůbec nezaznamenal, a to ani za 24 hodin. Je tak názorně vidět, že se simulovaný intenzivní déšť po dobu mnoha hodin projeví pouze nasycením povrchu půdy, přičemž prosáknutí do hlubších vrstev trvá velmi dlouhou dobu, pokud vůbec. Samozřejmě je tento jev velmi závislý na typu půdy. Pro testovací přípravek byla použita zemina pole umístěného v Kobeřicích (okres Opava), která typem odpovídá hnědozemí. Navíc byla půda záměrně značně zhutněna tak, aby odpovídala skutečným podmínkám panujícím na zemědělsky intenzivně využívaném poli obdělávaném těžkou technikou. Díky tomu půda hůře prosakuje, to bylo ostatně potvrzeno i měřením.

9.2 První etapa testování navržené sondy v terénu

V období od června do srpna roku 2020 proběhlo několik testování různých senzorových sestav přímo v terénu. Použity byly senzory verze 1.1 ve spojení s řídící deskou verze 1.0 a napájecí deskou verze 1.0.

9.2.1 Sestavení a instalace sondy v rámci první testovací etapy

Nejdříve byla testována konfigurace sondy se dvěma senzory, které byly umístěny v hloubce 5, respektive 15 cm pod povrchem. Řídící jednotka byla doplněna o dva senzory, LPS331 a HS3001. Jejich úkolem bylo měření atmosférického tlaku a také teploty a vlhkosti vzduchu uvnitř sondy.



Obrázek 69 – Sonda před sestavením pro měření v rámci první testovací etapy

Zapojení bylo doplněno o externí anténu a fotovoltaický panel, který zajišťoval dobíjení použitého akumulátoru. Po sestavení byla horní krytka, stejně tak jako okolí fotovoltaického panelu překryty vrstvou silikonu za účelem zamezení vniknutí vody dovnitř těla sondy.



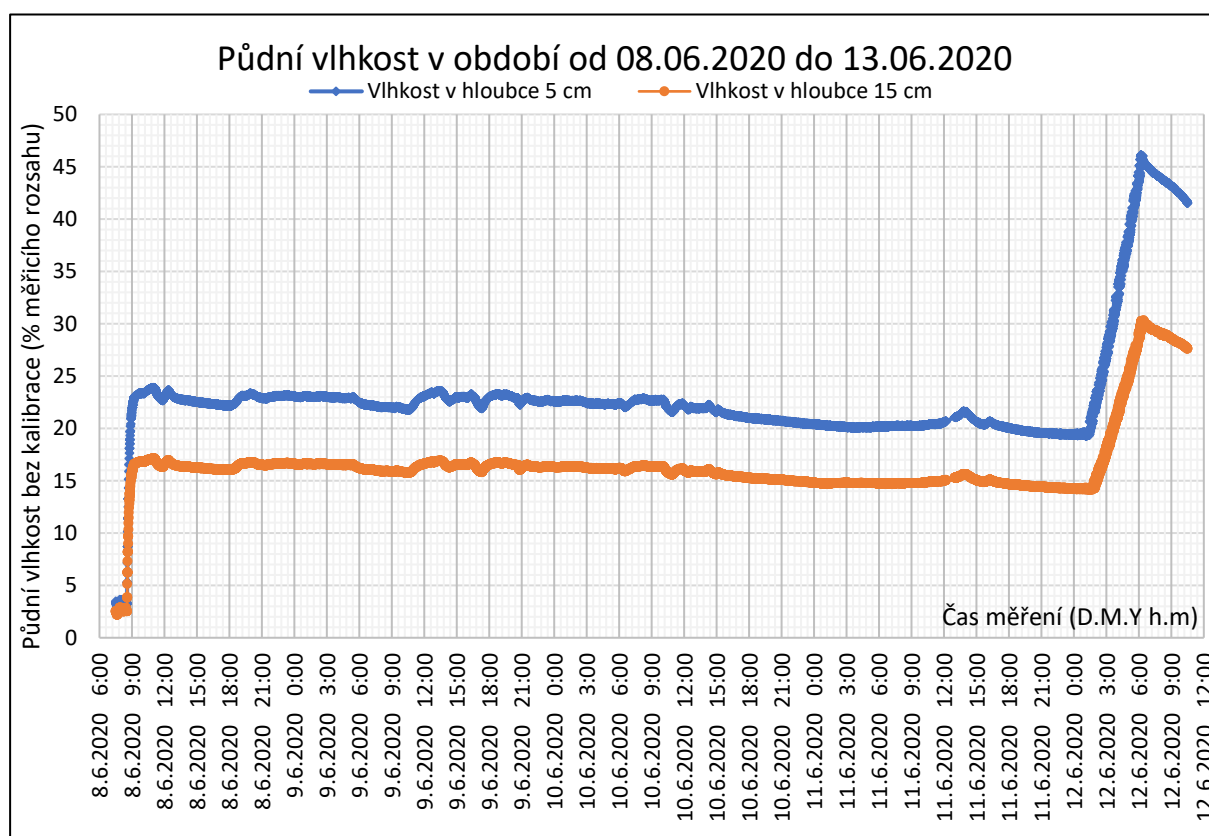
Obrázek 70 – Sonda instalovaná v rámci první testovací etapy

9.2.2 Naměřená data v rámci první testovací etapy

Samotné testovací období je rozděleno na dvě hlavní části. První část testování (od 08.06.2020 do 13.06.2020) byla ukončena po vniknutí vody dovnitř sondy, což mělo za následek poškození elektroniky. Z grafu vývoje půdní vlhkosti je patrné, že voda dovnitř těla sondy začala ve větší míře pronikat přibližně ve 2 hodiny ráno dne 12.06.2020. Problém byl identifikován ve spoji horního a spodního dílu, kdy vzhledem k rychlé změně teplot a deštivému počasí řady dnů po sobě došlo k poškození těsnění, které následně nebylo schopno dále plnit svou funkci. Nová verze sond tento problém odstranila.

Data sesbíraná v průběhu měření nevykazují žádnou zásadní změnu, to odpovídá i počasí v daném období – převážně zataženo s přeháňkami. Měření navíc probíhalo pouze krátkou dobu, výraznější změny se tedy nestihly projevit. Drobné kolísání, které je patrné v obou křivkách je způsobeno nedokonalou teplotní kompenzací. Rovněž lze z grafu vyčíst, kdy byla sonda instalována, tedy okolo osmé hodiny ráno, dne 08.06.2020.

Naměřené hodnoty půdní vlhkosti neodpovídají skutečné půdní vlhkosti, neboť i přes provedenou kalibraci nebylo možné zajistit dokonalý kontakt elektrod senzorů verze 1.1 se stěnou trubky, proto bylo přistoupeno k provádění měření bez kalibrace. Zobrazená data tak sice ukazují vývoj půdní vlhkosti, ale hodnoty nelze považovat za hodnoty objemové ani hmotnostní půdní vlhkosti. Osa Y tedy zobrazuje půdní vlhkost vztaženou k celkovému rozsahu senzoru (při ponoření do vody), jednotkou je tedy % měřicího rozsahu.



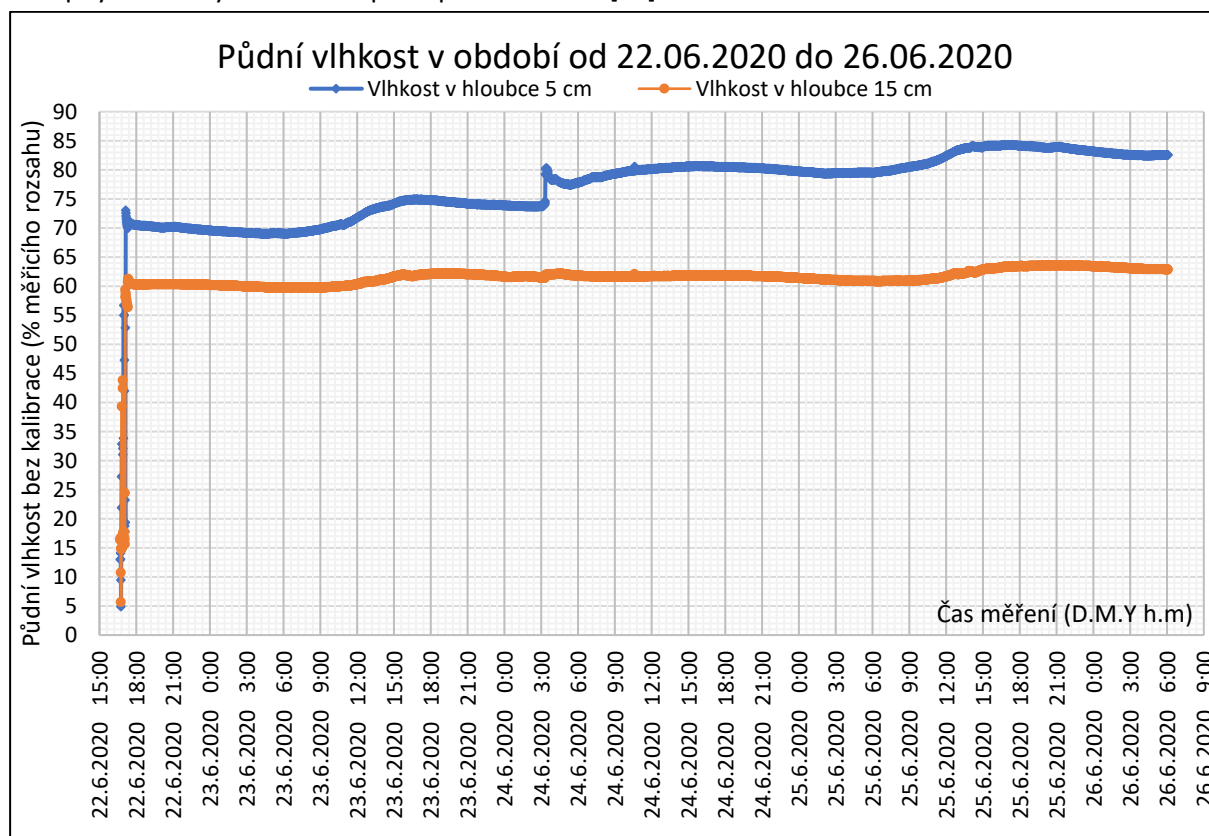
Obrázek 71 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 08.06.2020 do 13.06.2020

Druhá část prvního testovacího období probíhala od 22.06.2020 do 26.06.2020. Elektronika sondy byla opravena po poškození zatečením vody v rámci první části. U senzorů došlo k výměně elektrod, nové elektrody sice byly vyrobeny na míru pro konkrétní trubku tvořící tělo sondy, nicméně ani tato skutečnost nezabránila zkreslení měření, a proto bylo opět přistoupeno ke sběru surových hodnot bez kalibrace. Jednotkou osy Y jsou tedy opět % měřicího rozsahu senzoru, kdy 0 % odpovídá umístění senzoru na vzduchu a 100 % odpovídá ponoření senzoru do vody. Na první pohled je patrné, že půda je výrazně více nasycena oproti předchozímu měření, tomu odpovídá i množství srážek spadlých v době mezi měřeními. Konkrétně 20.06.2020 dle dat ČHMÚ v meteorologické stanici Opava (Otice) napršelo 22,5 mm srážek, které se vzhledem ke stavu svrchní části půdy dobře vsákly. [43]

Pro druhou polovinu testovacího měření byla rovněž upravena teplotní kompenzace, což se kladně projevilo na stálosti měření za různých teplot.

Instalace sondy proběhla okolo 17. hodiny dne 22.06.2020. Graf jasně znázorňuje, že senzory jsou schopny měřit půdní vlhkost prakticky okamžitě po instalaci, bez nutnosti usedání zeminy, jako je tomu v případě senzorů instalovaných pomocí výkopu a zpětného zasypání.

Data obou senzorů ukazují postupný růst půdní vlhkosti tak, jak v daném období přšelo. Zajímavostí je prudká změna půdní vlhkosti v hloubce 5 cm, která nastala v důsledku velmi intenzivního deště – meteorologická stanice Opava (Otice) dne 23.06.2020 naměřila úhrn 19 mm srážek, dešťová voda se však vzhledem k nasycení svrchní části půdy hůře vsakovala a zůstávala na povrchu déle, případně otekla pryč. Z naměřených dat je dále patrné, že senzor umístěný v hloubce 15 cm intenzivní srážky prakticky nezaznamenal, a to ani po třech dnech. Je tedy patrné, že intenzivní srážky sice mohou povrch země velmi rychle nasytit, hlubší vrstvy ale potřebují spíše mírné dlouhodobé srážky, aby byly schopny vodu z vyšších vrstev postupně vsakovat. [43]



Obrázek 72 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 22.06.2020 do 26.06.2020

I přes cenné poznatky získané během prvního testovacího období již nebylo v dalším měření pokračováno, místo toho bylo přistoupeno k vývoji nové verze elektroniky a sondy samotné za účelem odstranění zjištěných nedostatků. Tělo instalované sondy bylo v rámci vývoje dále ještě několikrát využito, nejednalo se však o žádné dlouhodobé měření a získaná data tak nemají praktický význam.

9.3 Druhá etapa testování navržené sondy v terénu

Sběr dat v průběhu dubna roku 2021 byl proveden třemi samostatnými sondami v konfiguraci dle tabulky číslo 3. Ke sběru dat bylo využito celkem 8 senzorů verze 2.2 ve spojení s řídicími jednotkami verze 2.0. Měření bylo provedeno na katastru obce Kobeřice (okres Opava).

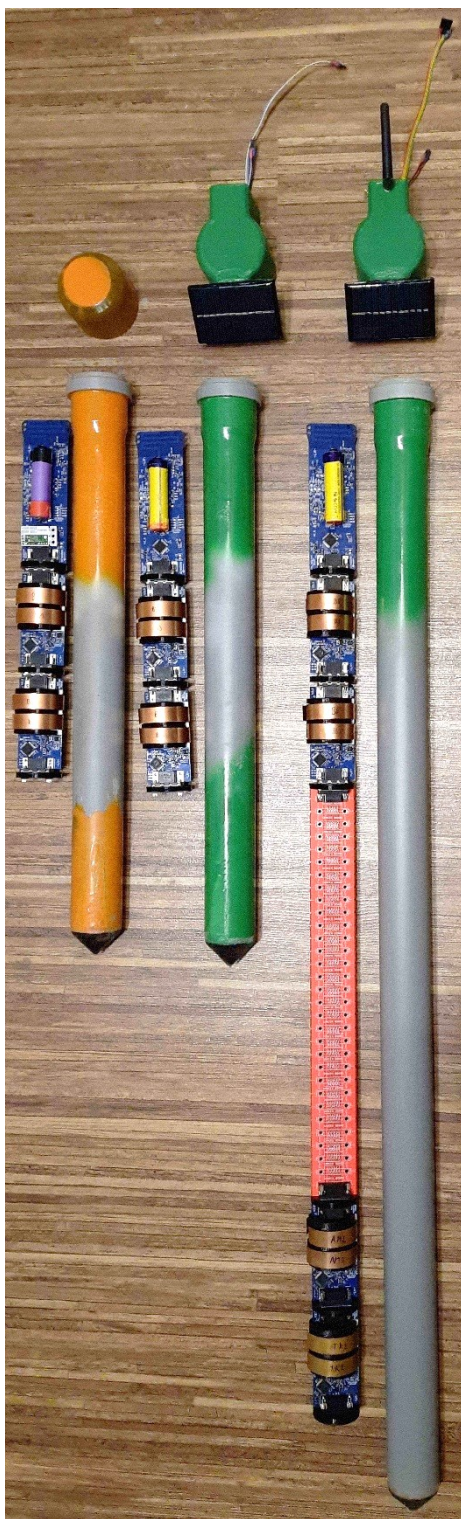
Tabulka 3 – Sestava sond určených pro druhou etapu testování

Název	Počet senzorů	Hloubka senzorů	Další vybavení
Sonda 1	2	5; 15 cm	Interní LPS331
Sonda 2	2	5; 15 cm	Externí LPS331, fotovoltaický panel
Sonda 3	4	-10; 0; 50; 60 cm	Externí HS3001+LPS331, fotovoltaický panel, externí anténa

9.3.1 Sestavení a instalace sond v rámci druhé testovací etapy

Jednotlivé sondy byly sestaveny tak, aby bylo možné otestovat co možná nejvíce funkcí a částí současně. První sonda tak například testuje výdrž akumulátoru bez možnosti dobíjení. Současně je zde testováno chování interní antény. Druhá sonda pak přináší poznatky o chování akumulátoru při nabíjení pomocí fotovoltaického panelu. Stejně tak je zde připojen externí senzor atmosférického tlaku a teploty (LPS331). Druhá sonda je rovněž vybavena interní anténou, přičemž je sledován vliv kabeláže vedoucí do horního zakončení sondy. Sílu signálu a případně poměr signálu k šumu lze sledovat právě v porovnání s první sondou. Třetí sonda pak představuje nejvíce komplexní zapojení, kdy je kromě čtyř senzorů testována například 40 cm dlouhá distanční vložka nebo externí anténa. Sonda je současně vybavena jak senzorem LPS331 umožňujícím měření atmosférického tlaku, tak i senzorem HS3001, který poskytuje data o teplotě a vlhkosti vzduchu. Akumulátor třetí sondy je rovněž dobíjen za pomoci fotovoltaického panelu.

Horní část těla první sondy byla opatřena výraznou oranžovou barvou, sonda je tak dobře viditelná i z větší vzdálenosti. Oproti tomu byly zbylé sondy opatřeny zelenou barvou, díky které v instalované lokalitě nijak zvlášť nevynikají. Různé barvy byly vybrány i z důvodu testování jejich odolnosti. Barva rovněž chrání plastové tělo sondy před přímým působením ultrafialového záření, navíc v případě horní částí poskytuje dodatečnou ochranu proti dešti, neboť by mikro-otvory dílů vyrobených pomocí 3D tisku mohla dovnitř sondy proniknout voda.



Obrázek 73 – Sondy před sestavením, určené pro měření v rámci druhé testovací etapy

Zemní otvory pro sondy byly vyvrtány pomocí vyrobeného vrtáku průměru 50 mm. K zajištění kolmosti otvoru vůči rovině země byla použita sestrojená pomocná plošina. Samotné vrtání probíhalo relativně pomalu, neboť půda byla v dané lokalitě velmi dobře nasycena vodou a uzavřená hlava vrtáku se často ucpávala v důsledku hromadění velmi mokré hlíny. Řešením by mohlo být použití otevřeného vrtáku (po vzoru Edelmanova vrtáku), ten by však nemusel vytvořit hladký a rovný vrt, čímž by mohlo dojít k problémům při vkládání sond nebo i při samotném měření. [48]



Obrázek 74 – Vrtání otvoru pro třetí sondu za pomoci vyrobeného vrtáku a pomocné plošiny

Sondy byly instalovány ve vzájemné vzdálenosti cca 1 metr tak, aby bylo zajištěno měření půdní vlhkosti ze stejných podmínek. Díky tomuto lze naměřená data bez problému srovnávat napříč sondami bez nutnosti úprav pro jiné typy půd, půdní horizonty nebo například sklon lokality.



Obrázek 75 – Instalované sondy v rámci druhé testovací etapy

9.3.2 Naměřená data v rámci druhé testovací etapy

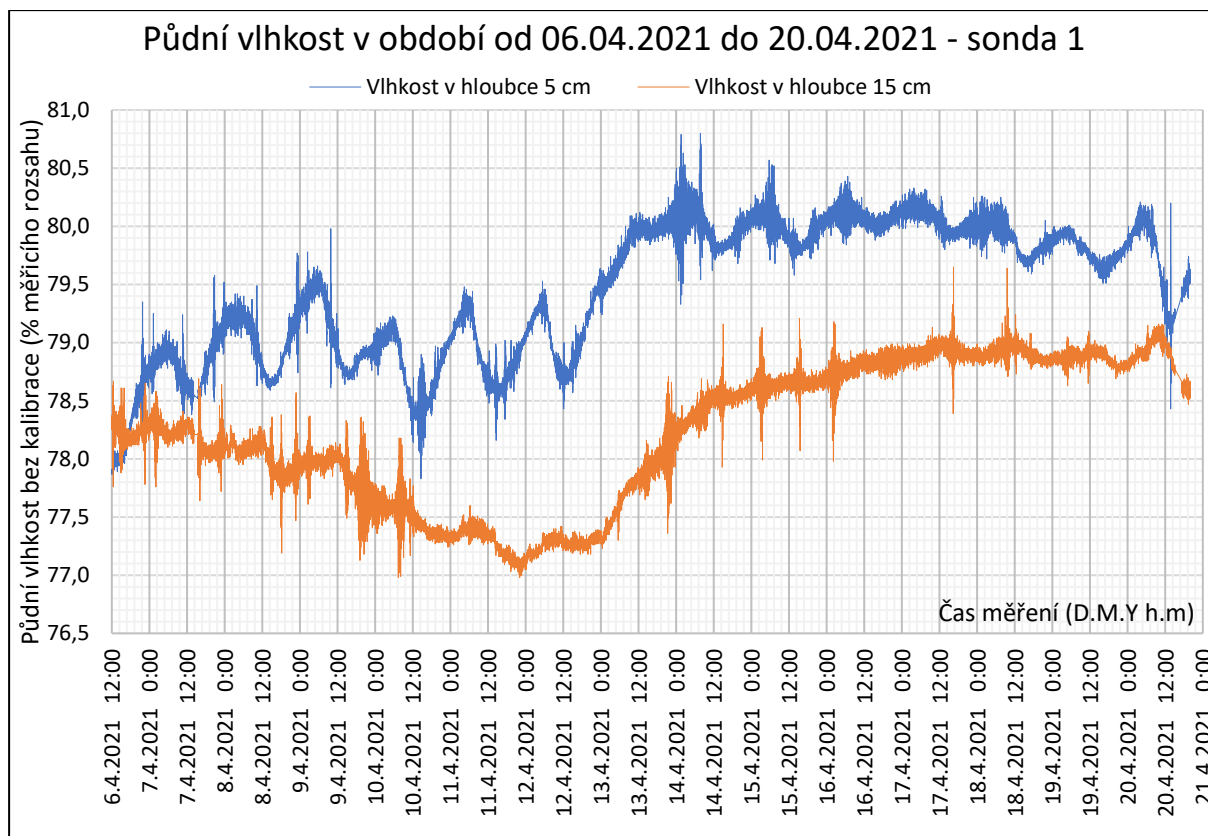
Druhá etapa testování byla ukončena k 20.04.2020. Jelikož je jedním z požadovaných parametrů životnost sond, sondy byly dále využity k měření, ale každá z nich byla vybavena novým programem, který řešil problémy vzniklé v průběhu testovací etapy.

Použité senzory byly před instalací dvoubodově zkalibrovány. Samotný přepočít surových hodnot na skutečnou hodnotu půdní vlhkosti dle kalibrační křivky však nebyl proveden, neboť tento nelineární přepočít v případě suchých půd značně potlačuje drobné rozdíly naměřených hodnot a sbíraná data po kalibraci by tak nemusela umožnit odhalení případných problémů. Proto bylo stejně jako v případě první testovací etapy opět přistoupeno ke sběru surových hodnot bez kalibrace. Na ose Y jsou tedy zobrazeny hodnoty s jednotkou % měřicího rozsahu senzoru, kdy 0 % odpovídá umístění senzoru na vzduchu a 100 % odpovídá ponoření senzoru do vody.

Sonda 1 provedla na jedno nabití akumulátoru (Li-Ion, typ 18650, 2 000 mAh) 10 081 měření a následných odeslání zpráv. Zpracování dat a pozdější přenesení do grafu přineslo určitá překvapení. Prvním z nich je pravidelné každodenní kolísání naměřených hodnot. Vždy okolo 6. hodiny ránní byla naměřena nejvyšší vlhkost, oproti tomu lokální pokles nastal vždy v odpoledních hodinách, zpravidla okolo 14. hodiny. Za slunných dnů byl rozdíl ranního maxima a odpoledního minima obvykle okolo 1 % měřicího rozsahu, v případě dnů se zataženou oblohou činilo kolísání přibližně 0,5 %. Každodenní pravidelná změna naměřené půdní vlhkosti může být způsobena řadou faktorů, nejpravděpodobněji ale změnou teploty. Samotný integrovaný obvod převodníku kapacity na digitální hodnotu je vybaven interní teplotní kompenzací. Původcem změny hodnot v závislosti na teplotě je tedy nejspíše jiná část měřicího obvodu, například kovové elektrody nebo plastové pružiny se mohou vlivem nízké teploty smršťovat. To by ale přineslo snížení naměřené kapacity, respektive půdní vlhkosti, což ale neodpovídá získaným datům. Toto kolísání je navíc patrné pouze v případě senzoru umístěného 5 cm pod povrchem. Senzor umístěný o 10 cm níže již tak zásadní kolísání nenaměřil. Možným původcem denního kolísání tak může být samotná půda, která se v průběhu dne slunečním svitem ohřívá, čímž může dojít ke snížení vlhkosti. Vzhledem k pravidelným, teplotně závislým změnám je ale možné získaná data s použitím informací o teplotě dále upravit.

Druhou zajímavostí jsou krátkodobé velké odchylky od jinak relativně stabilních hodnot. Tyto špičky se objevují v obou měřených hloubkách. Výrazná odchylka navíc zpravidla není tvořena pouze jednou naměřenou hodnotou, ale více po sobě jdoucími hodnotami. Příčina tohoto chování není známa. Spekulovat lze o vlivu živočichů žijících pod zemí, nicméně pravidelnost a velikost výkyvů ve dnech 14.04. až 16.04. tuto hypotézu prakticky vyvrací. Jednou z možných příčin by mohlo být vzájemné ovlivňování sond díky blízkosti jejich instalace, nicméně při spuštění každé sondy bylo důrazně dbáno na dostatečný rozestup mezi provedením měření vůči ostatním sondám, a to nejenom z důvodu současného měření, ale rovněž z důvodu zamezení současného vysílání více sond najednou. Přesný důvod vzniku výkyvů se nepodařilo zjistit, nicméně jejich vliv na získané informace je prakticky nulový, neboť naměřené špičky lze jednoduše odstranit statistickou úpravou dat, například průměrováním.

Graf na obrázku 76 zobrazuje všechny získané hodnoty půdní vlhkosti sondy 1 v rozmezí dnů 06.04.2020 až 20.04.2020 bez jakýchkoli úprav.

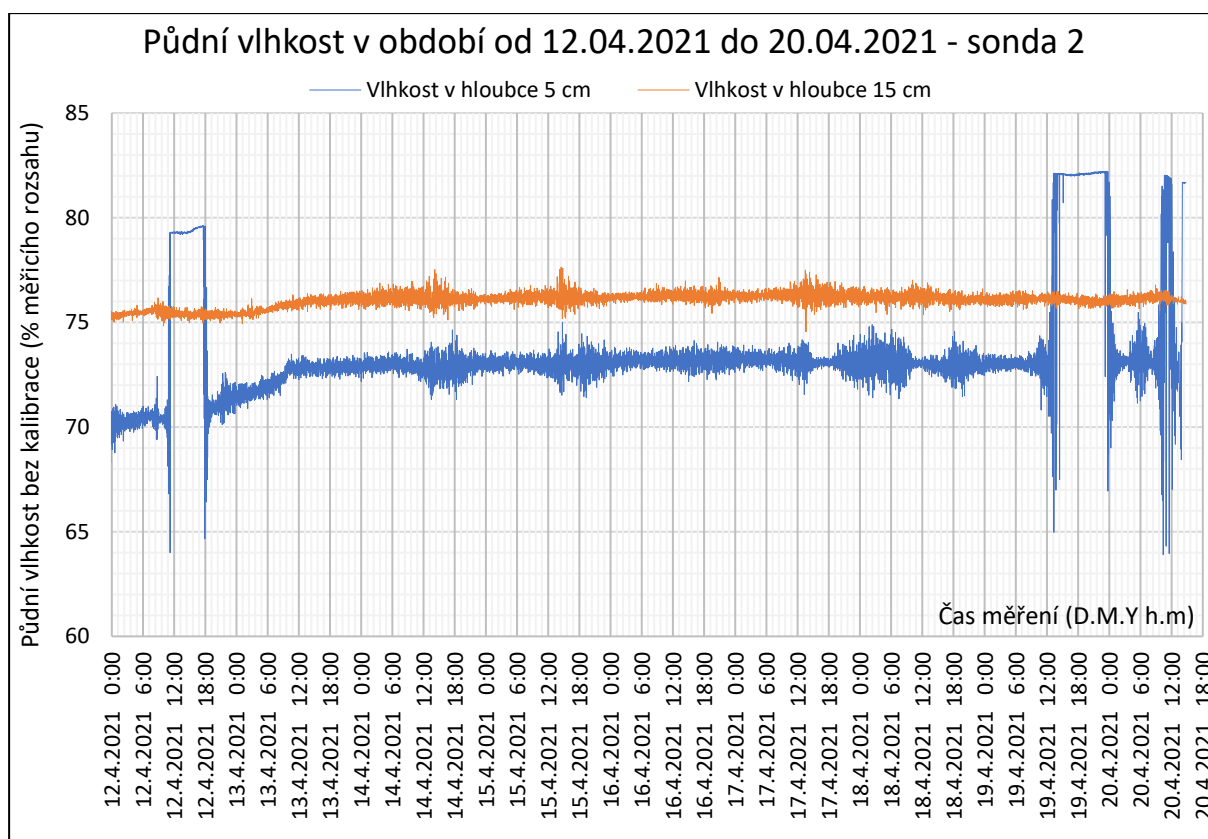


Obrázek 76 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 06.04.2021 do 20.04.2021, sonda 1

Sonda 2 prováděla hlavní sběr dat v období 12.04.2021 až 20.04.2021. Půdní vlhkost byla měřena v hloubce 5 a 15 cm. Vzhledem k častým přeháňkám a převážně zatažené obloze nelze v tomto období očekávat ve vývoji půdní vlhkosti nějakou zásadní změnu. Tomu odpovídají i naměřené hodnoty. Vzhledem k většímu rozsahu hodnot osy Y oproti grafu půdní vlhkosti naměřené sondou 1 nelze snadno pozorovat každodenní kolísání. Graf z obrázku 77 tak kromě jiného přináší na každodenní kolísání vlivem teploty jiný pohled.

Průběh půdní vlhkosti v hloubce 15 cm (oranžově) ukazuje téměř konstantní hodnoty v rámci celého sledovaného období. Hodnota za týden narostla o jediné procento, tedy přibližně ze 75 % rozsahu na 76 %.

Podstatně zajímavější je křivka půdní vlhkosti senzoru umístěného v hloubce 5 cm. Zde je vidět několik velmi prudkých změn půdní vlhkosti, kdy se v rámci přibližně 15 minut změnila naměřená hodnota o přibližně 10 % rozsahu senzoru. Přesný důvod této změny není znám. Jednou z možných příčin mohou být velmi intenzivní srážky, kdy dojde k dočasnému zaplavení měřené lokality vlivem nedostatečného vsakování. Byť tuto hypotézu podporují meteorologická data, je minimálně s podivem, že se takovéto množství srážek neprojevovalo ve větší hloubce ani za několik dní. Zvýšenou půdní vlhkost v období 12. a 13. dubna navíc zaznamenala i sonda 1. Dalším možným původcem těchto prudkých změn může být mechanický pohyb senzoru, například vlivem větru nebo pohybu okolní půdy vlivem teploty nebo srážek. Záběry z fotopasti sledující měřenou lokalitu nenasvědčují možnému pohybu sondy vlivem člověka nebo zvěře. Přesnou příčinu prudkých změn naměřené půdní vlhkosti se nepodařilo zjistit. [43]



Obrázek 77 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 12.04.2021 do 20.04.2021, sonda 2

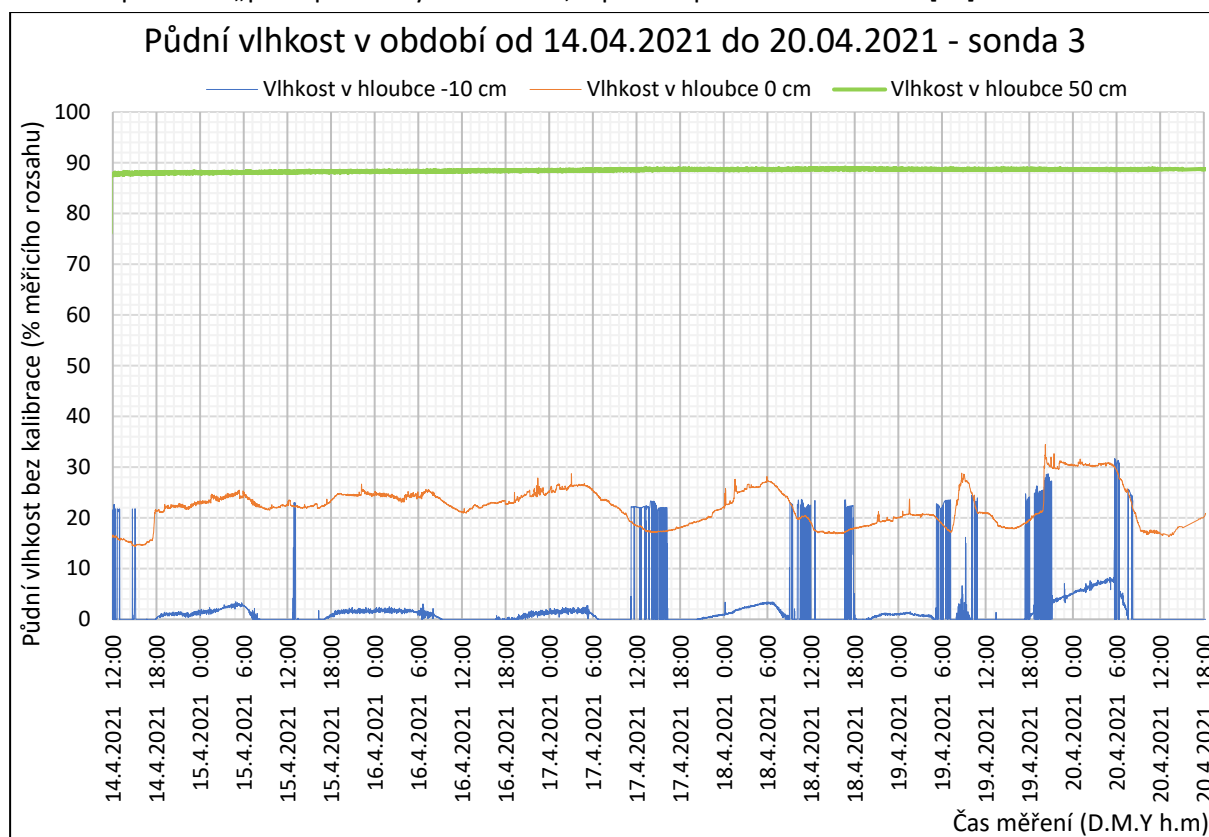
Graf na obrázku 78 zobrazuje vývoj naměřené půdní vlhkosti třetí sondou v období od 14.04.2021 do 20.04.2021. I přes instalaci celkem 4 senzorů jsou v grafu vyneseny pouze hodnoty tři z nich, neboť čtvrtý senzor byl v průběhu instalace nedopatřením poškozen a dále zobrazoval pouze jedinou hodnotu – maximální možnou. Analýza těchto hodnot tedy postrádá smysl.

Dle předpokladů měl senzor umístěný v hloubce -10 cm (tedy 10 cm nad povrchem) naměřit po celou dobu pouze nulovou hodnotu půdní vlhkosti. Z grafu je však dobře patrné, že nasbírané hodnoty se sice kolem nuly pohybují, nicméně rozhodně ne v jejím těsném okolí. Obdobně jako v případě první sondy se v naměřených hodnotách vyskytují prudké změny. Opět i v tomto případě jsou možnou příčinou intenzivní srážky, které mohou náhle a krátkodobě zvýšit naměřené hodnoty, nicméně je dosti zarážející, že hodnoty vždy vystoupají na téměř stejnou hodnotu. Jiným odůvodněním vzniku těchto náhlých změn může být působení zdroje rušení, ať už interního (například z jiných senzorů) nebo externího. Pravá příčina však zůstává i nadále neznámá.

Zajímavé poznatky přináší senzor, jehož mezera mezi měřicími elektrodami byla umístěna do nulové hloubky, tedy přímo na rozhraní země-vzduch. Po celou dobu měření senzor vykazoval nenulovou hodnotu půdní vlhkosti, ta ale byla výrazně ovlivněna právě umístěním jedné elektrody do vzduchu. Senzor by tak měl dle předpokladů velmi dobře reagovat na případné srážky, tato teorie se však nepotvrdila, neboť křivka hodnot naměřených senzorem kolísá zejména v závislosti na teplotě, ne až tak na množství srážek. Výjimku tvoří dny 14.04. a 19.04., kdy v obou případech okolo 18. hodiny došlo k prudké změně v naměřených hodnotách (o 5, respektive 10 % rozsahu senzoru) právě vlivem srážek.

Senzor v hloubce 50 cm dle předpokladů naměřil vždy téměř stejnou hodnotu půdní vlhkosti, naměřená křivka tak připomíná konstantní funkci. Zajímavým zjištěním je naměření hodnoty půdní

vlhkosti téměř 89 % rozsahu senzoru. To odpovídá situaci při vrtání otvoru pro umístění sondy, kdy byly prakticky všechny odebrané půdní vzorky až do hloubky 70 cm hodnoceny číslem 4 až 5 z pětibodové stupnice, dle webu Intersucho tedy „vlhká půda dobře tvarovatelná s možností otisknutí prstu“ až „půda plně nasycená vodou, ulpívá na prstech – bahnitá“. [44]



Obrázek 78 – Graf vývoje půdní vlhkosti od 14.04.2021 do 20.04.2021, sonda 3

9.4 Možné využití půdní sondy a naměřených dat

Informace o půdní vlhkosti lze využít k různým účelům. Samozřejmě využití je v zemědělství při pěstování různých plodin nebo například v sadech ovocných stromů. Konkrétní potenciální využití navržených sond půdní vlhkosti bylo konzultováno se sadařem, panem Matoušem Hodulou z Opavy-Kylešovic. Ten by dle e-mailové komunikace nejen ve svém sadu obdobný měřicí systém uvítal, uvedl rovnou tři konkrétní případy. Všechny se přitom opírají o nedostatek informací ohledně množství dostupné vody v půdě. Rovněž se dále vyjádřil, že by systém sledující půdní vlhkost uvítal jako cenného pomocníka při experimentech, například při zjišťování skutečného dopadu zalévání ovocných stromů (zejména zákrsků) v obdobích sucha.

Druhým konzultantem využití navrženého systému v praxi byl agronom z velkého zemědělského podniku na Hlučínsku, který si však přál zůstat v anonymitě. Prostřednictvím elektronické pošty poskytl pohled do hospodaření běžného zemědělského střediska, vyzdvihl přitom současné nedostatky péče o plodiny. Právě navržené půdní sondy by mu, dle jeho názoru, velmi pomohly při rozhodování o konkrétních zásazích na polích. Díky nim by tak mohlo dojít ke snížení objemu použitého postřiku, stejně tak jako k vhodnějšímu hnojení, například zvolením jiného typu hnojiva (granulované nebo kapalné).

9.4.1 Obaleč jablečný

Housenky tohoto motýla velmi často poškozují plody jabloní, případně i dalších ovocných stromů. Běžně jsou zmiňovány jako jeden z nejčastějších důvodů červivosti plodů, samotná housenka přitom obvykle nezpůsobí největší škodu, neboť zdravý strom dokáže ránu po průchodu červa dovnitř plodu zacelit a zahojit. Takto napadený plod běžně dozraje, byť zpravila dříve oproti ostatním, nicméně je možné jej dále zpracovat a využít například k výrobě moštu. Problém nastává v situaci, kdy se napadený strom nenachází v dobré kondici a nedokáže otvor způsobený vniknutím červa dostatečně zacelit. Skrze tuto otevřenou ránu pak plod zpravidla infikuje plíseň šedá, která způsobí jeho plesnivění, kvůli čemuž již plod nelze dále využít a musí být zlikvidován.

Jedním z častých důvodů nedobré kondice ovocných stromů je nedostatek vláhy. V případě starších odrůd se tento problém nevyskytoval tak často, neboť se zpravidla jednalo o vyšší stromy s hlubším kořenovým systémem, který dokázal strom zásobovat vodou i v případě suché horní vrstvy půdy. Moderní způsob pěstování však většinou využívá stromy založené na zakrslých podnožích, neboť takovéto stromy jsou díky nízkému vzrůstu snáze přístupné při sklizni a rovněž tolik nestíní okolním stromům v případě pěstování formou takzvaných ovocných stěn. Tyto zakrslé podnože však s sebou přinášejí zásadní nevýhodu ve formě méně hlubokých kořenů, které tak v případě delšího sucha již nedosáhnou na půdní vodu ve větší hloubce. Výsledkem je oslabení stromu, který se pak zpravidla nedokáže účinně bránit škůdcům a chorobám. Problém zakrslých ovocných stromů je tak obdobný jako u smrkového porostu, který svými plytkými kořeny nedokáže účinně čerpat vodu z větších hloubek, díky čemuž jsou v suchém období stromy oslabeny a jejich schopnost obrany vůči kůrovci formou vytváření dostatečného množství smůly je zásadně zhoršena. Měření půdní vlhkosti, respektive vhodná a dostatečná závlaha tak může sadařům přinést výhodu nejen ve formě většího výnosu, ale i prostřednictvím ušetření nákladů za případný postřik a jeho aplikaci.

9.4.2 Hořká pihovitost jablek

Jedná se o častou vadu plodů některých odrůd, kdy se na povrchu vyskytují hnědavé skvrny a dužnina pod nimi je chuťově nepříjemná. Takováto jablka jsou nejen méně vzhledná, ale rovněž je u nich při skladování zkrácena trvanlivost. Důvodem vzniku pihovitosti však nejsou škůdci či choroby, ale nedostatek vápníku. Problém však vždy nemusí být způsoben nedostatečným množstvím vápníku v půdě, ale spíše omezenou schopností určitých odrůd tento vápník dostatečně čerpat. Očividné řešení formou použití hnojiva s obsahem vápníku tak nemusí problém pihovitosti řešit. Na vině může být nedostatek vody v půdě, díky čemuž daný strom nedokáže vápník rozpuštěný v půdní vodě přijímat v dostatečném množství. Řešení problému pihovitosti jablek formou dostatečné závlahy ovocných stromů je dle vyjádření pana Hoduly experimentální, ale právě z tohoto důvodu vyjádřil o sondy půdní vlhkosti zájem, neboť by díky nim mohl své poznatky reálně změřenými hodnotami ověřit.

9.4.3 Netradiční způsob pěstování zeleniny ve skleníku

Posledním uvedeným příkladem možného využití půdních čidel je změna vodního hospodářství ve sklenících. Klasické pěstování zahrnuje častou pravidelnou závlahu, nicméně tímto způsobem může snadno dojít k šíření plísňových chorob, kterým se na mokřém povrchu půdy dobře daří. Alternativou může být pouze občasná, ale intenzivní závlaha, kdy je povrch půdy po většinu času velmi suchý. Tímto způsobem hospodaření lze nejen omezit výskyt plísňových chorob, ale rovněž jsou rostliny donuceny vést své kořeny hlouběji do půdy. Díky tomu mohou mít k dispozici i více živin a rostliny jsou celkově

zdravější a odolnější. Další výhodou je snížení výparu použité závlahy, díky čemuž je sníženo množství použité vody, což může být zvláště v období sucha velmi přínosné.

Problémem tohoto pěstebního způsobu je značně obtížný odhad půdní vlhkosti ve větší hloubce. Povrch půdy sice může být vyprahlý, nicméně nižší vrstvy půdy mohou rostlinám i nadále poskytovat dostatečnou zásobu vody. Při následném přemokření mohou nastat problémy s hnilobou kořenů, v případě nedostatku vody v půdě naopak může dojít k usychání rostlin. Právě pro tento případ je výhodné využít navrženou sondu schopnou měřit půdní vlhkost v různých hloubkách současně. Většinou stísněné prostory skleníku, kde je každý decimetr čtvereční ceněným místem, dále vyzdvihují schopnost měření celého zájmového půdního horizontu pouze pomocí jednoho instalačního bodu, navíc s minimálním narušením okolí v průběhu instalace.

Použitím navržené sondy půdní vlhkosti je tak opět možné kromě potenciální úspory vody omezit či zcela odstranit potřebu postřiku proti plísňovým chorobám, čehož mohou využít zejména zemědělci a pěstitelé pracující dle zásad takzvaného ekologického zemědělství.

9.4.4 Zemědělské využití sond půdní vlhkosti

Jedním z příkladů využití znalosti o množství vody v půdě může být optimalizace používání postřiku pro regulaci délky stébel u obilnin. Pokud panuje teplé počasí a zároveň je vlhkost půdy vysoká, dojde k rychlému prodloužení stébla a obilnina je poté náchylnější k poléhání. Výsledkem je nejen obtížnější sklizeň, ale také nižší kvalita produkce. Použitím postřiku je možné délku stébel regulovat, postřik však musí být použit vhodně. Například aplikace při nedostatku půdní vlhkosti může vést k negativním dopadům, které ve výsledku snižují výnos. Faktorů ovlivňujících vhodnost a správné načasování použití postřiku je mnoho, právě půdní vlhkost je ale jedním z nejdůležitějších.

Navržená půdní sonda může rovněž pomoci se správným hnojením. Účinnost hnojení je z velké části ovlivněna právě půdní vlhkostí. Aby se živiny dostaly do půdního roztoku, odkud mohou být přijaty kořeny, musí se granulované hnojivo po aplikaci rozpustit. Zde hraje půdní vlhkost zcela zásadní roli. Byť jsou granule samotné schopné vyčkat na povrchu půdy na srážky i řadu dní, není žádoucí hnojivo aplikovat bez rozmyslu. Větretem nebo případnými intenzivními srážkami může dojít k odnesení či odplavení a následné koncentraci hnojiva v údolí dané lokality, případně může být hnojivo bez užitku zcela odplaveno pryč. Pomocí dat o půdní vlhkosti je tak možné aplikaci granulovaného hnojiva lépe načasovat tak, aby došlo k jeho efektivnímu využití.

Jedním z nejsložitějších běžně řešených zemědělských problémů je použití močoviny, která představuje velmi efektivní způsob hnojení dusíkem. Musí se však aplikovat ideálně na vlhkou půdu, případně by do čtyř dnů od aplikace mělo spadnout alespoň 5 mm srážek, jinak dojde k uvolňování dusíku (amoniaku) do atmosféry. Naopak v případě přemokřené půdy hrozí odplavení močoviny z pole pryč – s tím je spojeno riziko znečištění vod. Informace o půdní vlhkosti tak hraje u aplikace močoviny klíčovou roli, právě zde by mohla navržená půdní sonda přinést největší užitek.

Posledním příkladem zemědělského využití sondy půdní vlhkosti je určení vhodnosti dané lokality k pěstování vybraných plodin. Na základě dlouhodobého sledování množství vody v půdě je možné například vytyčit oblasti s dostatečnou půdní vlhkostí i v letních měsících, neboť právě takovéto lokality jsou velmi vhodné pro pěstování cukrové řepy. Stejně tak je možné například identifikovat místa s rychle se měnící půdní vlhkostí, díky čemuž může být v případě příznivých podmínek usnadněna sklizeň.

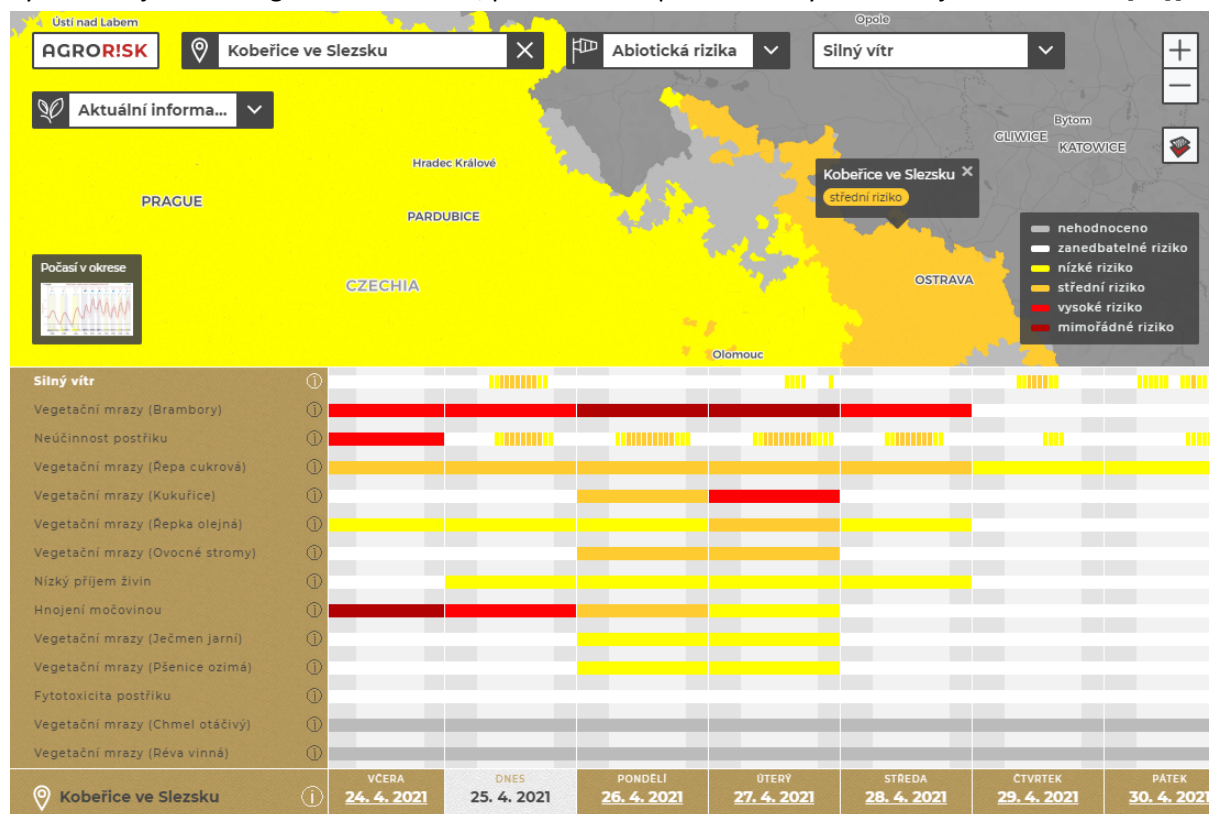
9.5 Další využití navrženého senzoru

Informace o půdní vlhkosti lze využít k různým účelům. Samozřejmě využití je při pěstování plodin, kdy mohou být naměřené hodnoty použity k řízení závlahy nebo pouhému určení kondice rostlin nebo jejich plodů. Ze senzorů umístěných těsně pod povrchem půdy (cca 5 cm) je pak možné například zjistit, zda je na danou lokalitu možné vjet těžkou technikou nebo zda by mohlo dojít k jejímu zapadnutí do podmaččené půdy.

V případě opačné situace, kdy senzor umístěný blízko povrchu hlásí velmi nízkou vlhkost půdy ve svrchní části, je pak možno vyhodnotit riziko větrné eroze obhospodařovaných lokalit. Tím je možné zabránit nežádoucímu úbytku úrodné půdy, která je v současné době velkým problémem zemědělského průmyslu.

Navrženou sondu, určenou k měření půdní vlhkosti, je rovněž možné použít k měření teploty a vlhkosti kompostu, hnoje či siláže. Získaná data tak mohou například napomoci správnému kompostování nebo mohou poskytnout informaci o vhodné době pro přehození kompostu.

Nasbíraná data navržených půdních sond by mohla být využita v rámci internetových stránek Intersucho, které slouží k mapování půdní vlhkosti a rozvoje sucha napříč Českou republikou. Dalším možným odběratelem dat může být web AgroRisk, který pro zemědělce a pěstitele zdarma vyhodnocuje možná agronomická rizika, půdní vlhkost přitom u řady z nich hraje klíčovou roli. [44][45]



Obrázek 79 – Aktuální agronomická rizika dle webu AgroRisk [45]

9.5.1 Použití senzoru a naměřených dat mimo původní účel

Vzhledem k principu měření a konstrukci senzoru je možné jej využít i k jinému než původnímu účelu. Případně je možno konstrukci senzoru upravit změnou elektrod, čímž je možné senzor původně určený k měření půdní vlhkosti využít i v jiných aplikacích.

Senzor se dá kromě měření půdní vlhkosti využít také k měření výšky sněhové pokrývky. Kromě samotné výšky (respektive hloubky sněhu) dokáže senzor zjistit i míru udusání sněhu, případně i typ – těžký mokrý sníh versus čerstvě napadaný sníh (takzvaný „prašan“). S rostoucí mírou udusání sněhu pak roste i naměřená kapacita. Naměřená teplota v dané výšce pak může odhalit, zda se jedná o mokrý nebo pouze o silně udusaný sníh. Využití této skutečnosti je hned několik. Modelovým případem může být pole s plodinami zasetými na podzim. Zkonstruovaná sonda pro měření půdní vlhkosti pak bude sestavena například ze čtyř měřicích modulů – bude tedy schopna měřit ve čtyřech úrovních. Tři senzory mohou být umístěny klasicky pod úroveň země (například hloubky 5 cm, 15 cm a 55 cm), přičemž poslední modul bude umístěn 5 cm nad úroveň terénu. Tento čtvrtý modul tak bude schopen měřit přítomnost a kompaktnost (případně i typ) sněhové pokrývky. Toto měření pak může poskytnout důležité informace, například zda mohlo dojít k omrznutí nebo úplnému zmrznutí rostlin. Pokud nadzemní senzor detekuje žádné nebo pouze velmi malé množství sněhu a současně je naměřena teplota vzduchu například -15 °C, tak je pravděpodobné, že u citlivých rostlin dojde k omrznutí nadzemních částí (někdy je tento jev označován jako „popálení mrazem“). V opačném případě, u kompaktní sněhové pokrývky, kdy senzor navíc naměří výšku přesahující 5 cm je možno předpokládat, že k omrznutí přízemních částí rostlin nedojde, případně až za delší dobu. Na základě získaných informací je pak možno vyhodnotit stav plodin po zimě bez nutnosti fyzické přítomnosti osoby na dané lokalitě.

Dalším příkladem využití možnosti měření množství a typu sněhové pokrývky může být meteorologická stanice, kdy lze díky naměřeným hodnotám orientačně zjistit i množství vody, které je ve sněhové pokrývce uloženo.

Vzhledem k principu měření je možné detekovat i zaplavení dané oblasti. Při umístění sond na vhodná místa je tak například možné sledovat, zda se srážky při intenzivním dešti ještě dokážou vsakovat nebo zda již hrozí vodní eroze měřené lokality. Získané informace pak mohou pomoci v budoucnu při plánování vysetí daných typů plodin, případně i orientaci setí.

Stejně tak je možné sondu použít na březích nádrží, jezer a rybníků nebo jejich hrázích, neboť senzor dokáže současně měřit vlhkost půdy (vsakování vody) a také výšku vodní hladiny. U hrází je tak například možné sledovat jejich stav a případné poškození nebo dokonce i upozornit na možné hrozící protržení hráze.

Jelikož navržený senzor využívá kapacitní metodu založenou na měření přítomnosti vody v blízkém okolí, je možné jej využít i pro měření vysychání betonu (například u podlahového topení) či zdí (například sklepní prostory). Pro tento účel je ale potřeba změnit tvar měřicích elektrod a jejich umístění. Elektronika včetně programového vybavení však může zůstat stejná.

9.6 Další směry vývoje navrženého systému

Vzhledem k odhaleným nedostatkům navržené půdní sondy je před případným komerčním provozem prostor k dalšímu vývoji.

Jedním z problémů je vnikání vlhkosti dovnitř těla sondy. Nově navržená horní krytka sice odstranila problém se zatékáním dešťových srážek, nicméně neumožňuje hermetické uzavření (kvůli kabeláži atmosférických senzorů a externí anténě) a dovnitř těla sondy tedy postupně proniká vzdušná vlhkost. Ta vlivem teplotního rozdílu uvnitř kondenzuje a postupně stéká do spodní části – zde je sice jímána pohlcovačem na bázi chloridu vápenatého, nicméně toto řešení poskytuje pouze dočasnou ochranu, než dojde k nasycení pohlcovače. Možné řešení problému formou dokonalého zatěsnění

například pomocí silikonu značně ztěžuje servis sond. Jako nejlepší řešení se v současné době jeví použití vícedílné horní krytky. Jedna část, obsahující atmosférické senzory nebo například externí anténu, by byla s tělem sondy pevně spojena a dokonale zatěsněna. Případný servisní zásah by byl snadno proveden oddělením druhé části. Vzájemné spojení obou částí by mohlo být provedeno například šroubovým spojem s použitím těsnicího O kroužku. Díky tomu by bylo horní zakončení zcela vzduchotěsné a zabránilo by tak vniku vlhkosti.

Rovněž je potřeba zjistit příčinu teplotní závislosti a prudkého vývoje změn naměřených hodnot senzorů umístěných blízko povrchu. Jedná se však o časově velmi náročnou činnost vyžadující další výzkum.

Další změny je možné provést v použitém programu sond, neboť jeho vhodnou úpravou je možno dále snížit spotřebu elektroniky a prodloužit tak interval servisního zásahu při bateriovém provozu. Současná verze sondy, v konfiguraci se dvěma senzory půdní vlhkosti a se senzorem vzdušné teploty a vlhkosti, byla schopna odeslat více jak 15 000 zpráv na jedno nabití akumulátoru (Li-Ion, typ 18650, 2 000 mAh).

Velký prostor pro vylepšení celého navrženého měřicího a zavlažovacího systému je v návrhu nadřazeného řídicího systému, který by naměřené hodnoty analyzoval a na jejich základě vydával doporučení nebo přímo prováděl například automatickou závlahu. Navržená řídicí jednotka závlahového systému díky své univerzálnosti umožňuje například i ovládání otevírání oken, čehož by mohlo být výhodně využito zejména v rámci automatizace pěstování ve skleníku. Návrh a realizace takového nadřazeného řídicího systému však představuje časově velmi náročný úkol a dalece přesahuje rozsah této práce.

Možným vylepšením navržené sondy by mohlo být přidání vibračního, akustického nebo optického odpuzovače zvěře. Bylo by tak možné alespoň částečně omezit škody napáchané nežádoucími živočichy bez použití chemických odpuzovačů.

Závěr

Předmětem této diplomové práce byl návrh bezdrátového měřicího systému půdní vlhkosti, který využívá kapacitní princip měření a následný přenos dat pomocí sítě LoRa. Navržené, sestavené a odzkoušené zařízení má tvar trubky průměru 50 mm a skládá se z řídicí elektroniky a jednotlivých senzorických modulů. Do horní části zařízení je možné umístit různé atmosférické senzory, například pro měření teploty, vlhkosti nebo tlaku vzduchu. Horní zakončení může být rovněž osazeno externí anténou nebo i fotovoltaickým panelem, který následně umožňuje nepřetržitý celoroční provoz zařízení bez potřeby výměny baterií.

Návrhu senzoru půdní vlhkosti předcházela důkladná analýza dostupných metod. V průběhu práce byly postupně vyvíjeny a zkoušeny různé verze senzorů a řídicích jednotek s odlišným obvodovým zapojením za účelem dosažení optimálních parametrů senzorů a ve snaze o co možná nejpresnější výsledky měření. Senzory byly od začátku vyvíjeny s myšlenkou na jejich umístění do plastového těla ve tvaru trubky. Právě tento tvar umožňuje nejen velmi snadnou instalaci vložením do připraveného vrtu, ale také umístění více senzorů nad sebe, díky čemuž je možno měřit vlhkost více půdních horizontů v rámci jediného instalačního bodu.

Pro přenos dat byla na základě analýzy vybrána bezdrátová technologie LoRa, která se kromě nízké energetické náročnosti vyznačuje také dlouhým dosahem v řádu jednotek kilometrů. Sondy je tak možné rozmístit na velké ploše bez obav o nedostatečný signál sítě LoRa. Velkou výhodou této technologie je možnost provozu vlastní brány pokrývající danou lokalitu signálem, díky čemuž není potřeba platit operátorům poplatky za přenos dat. Sběr dat probíhal zejména v rámci dvou testovacích období, v létě 2020 a na jaře roku 2021. Celkem bylo technologií LoRa bez větších problémů bezdrátově přeneseno 501 642 zpráv, což dokazuje vhodně vybranou přenosovou technologii.

Samotná data jsou pomocí protokolu MQTT odeslána z brány sítě LoRa přes internet do místního úložiště, založeném na jednodeskovém počítači Raspberry Pi, kde jsou následně data ukládána do databáze InfluxDB. Vizualizace dat využívá známé služby Grafana, která umožňuje rychlou tvorbu přehledných a dobře čitelných grafů.

Využití naměřených hodnot půdní vlhkosti tak jako i reálné nasazení navržených půdních sond bylo konzultováno se sadařem, panem Matoušem Hodulou, stejně tak i s agronomem z velkého zemědělského podniku na Hlučínsku (přál si zůstat v anonymitě). Oba podrobně popsali možné využití získaných dat, rovněž o podobný systém projevíli zájem. V neposlední řadě přinesli cenné poznatky pro další vývoj půdních senzorů a sond samotných.

V rámci této práce byly navíc oproti zadání vytvořeny i další zařízení, zejména vývojové a kalibrační zařízení nebo řídicí jednotka závlahového systému. Pro konfiguraci sond byl dále vytvořen počítačový program, který jinak pracnou činnost zásadně zjednodušuje. Pro rychlou kontrolu funkčnosti a správně provedené instalace sond byla vytvořena aplikace určená zařízením s operačním systémem Android. Současně byl navrhnout a zkonstruován půdní vrták, včetně pomocné plošiny zajišťující kolmost vrtu vůči povrchu, díky čemuž je umístění půdních sond v dané lokalitě dále zjednodušeno.

Navrženou sondu půdní vlhkosti lze dále vyvíjet, zejména za účelem snížení spotřeby a možnosti snazší vzdálené konfigurace. Vývojové a kalibrační zařízení, současně i řídicí jednotka závlahového systému by mohly být doplněny o přehlednější grafické uživatelské rozhraní. Celý navržený systém by mohl být rozšířen o plně automatickou funkci závlahy s možností učení se a napojením na předpověď počasí za účelem optimalizace funkce a schopnosti předvídat půdní podmínky.

Literatura

- [1] TOPP, G. Clarke, James L. DAVIS and Aa P. ANNAN. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *WATER RESOURCES RESEARCH*.1980, vol. 16, no. 3, pp. 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>.
- [2] BAXTER, Larry K. Capacitive sensors: design and applications. New York: IEEE Press, c1997. IEEE Press series on electronics technology. ISBN 0-7803-1130-2.
- [3] VOPRAVIL, Jan. Půda a její hodnocení v ČR. Díl I.. 2. vyd. Praha: Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, 2010. ISBN 978-80-87361-05-4.
- [4] SENEVIRATNE, Pradeeka. Beginning LoRa Radio Networks with Arduino: Build Long Range, Low Power Wireless IoT Networks. Imprint: Apress, 2019. ISBN 978-1-4842-4357-2.
- [5] CULIC, Ioana, Alexandru RADOVICI a Cristian RUSU. Commercial and Industrial Internet of Things Applications with the Raspberry Pi [online]. Berkeley, CA: Apress, 2020 [cit. 2020-09-22]. ISBN 978-1-4842-5295-6. Dostupné z: [doi:10.1007/978-1-4842-5296-3](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-5296-3).
- [6] BUNTJER, Julie. New tiling technique stores water, nutrients in soil. *The Globe* [online], 29. srpen 2013 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.dglobe.com/1653986-new-tiling-technique-stores-water-nutrients-soil>
- [7] LITSCHMANN, Tomáš. Měření půdní vlhkosti. *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Brno: AMET, 2010 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2010/Z0075/um/Prednaska_Dr_Litschmann_PudniVlhkost.pdf
- [8] Is soil moisture sensor corrosion normal? *Raspberry Pi Stack Exchange* [online]. 2017 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://raspberrypi.stackexchange.com/questions/68133/is-soil-moisture-sensor-corrosion-normal>
- [9] Gypsum Block - G-BLOCK. *ICT International* [online], 2014 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://www.ictinternational.com/products/5201/gypsum-block-g-block/?from=/soils/water-potential-field/>
- [10] Irrrometer, 200SS-15 Model 200SS Watermark Moisture Sensor. *MEGADEPOT* [online]. IRROMETER, 2020 [cit. 2020-05-05]. Dostupné z: <https://megadepot.com/product/irrometer-200ss-15-watermark-soil-moisture-sensor-with-15-wire>
- [11] Soil Tensiometer. *IndiaMART* [online]. Saaral Agro Tech, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/soil-tensiometer-20164541455.html>
- [12] 2014 Lodi Grower Survey – Report of Results. *Lodi Growers* [online]. Lodi Growers, 2014 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.lodigrowers.com/2014-lodi-grower-survey-report-of-results/>
- [13] TDR-315H Soil Moisture Sensor. *LANDSCAPE TECHNOLOGIES* [online]. LANDSCAPE TECHNOLOGIES, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://www.landscapetechnologies.com.au/store/I0v2ont6q64ffkrxjrrkxbvfw5w90q>
- [14] Big diy SENSOR topic. *The Things Network Forum* [online]. The Things Network, 2018 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/forum/t/big-diy-sensor-topic/2600/123>
- [15] EnviroSCAN - profilová vlhkostní sonda. *EkoTechnika* [online]. Sentek, 2020 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: https://ekotechnika.cz/sites/default/files/pdf/datasheet_vlhkostni_cidlo_enviroscan_2020.pdf

- [16] HT Odpadní systém. *DYKA* [online]. DYKA, 2020 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.dyka.cz/cz/Pages/HT-syst%C3%A9m.aspx>
- [17] DC/DC Converter TBA 1HI Series, 1 Watt. *Traco Power* [online]. Traco Electronic, 2020 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://www.tracopower.com/sites/default/files/products/datasheets/tba1hi_datasheet.pdf
- [18] Series AM1D-Z 1 Watt | DC-DC Converter. *Aimtec* [online]. Aimtec, 2020 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/AM1D-Z.pdf?ft4=15-929>
- [19] RE 1 Watt SIP7 Single Output. *TME* [online]. Recom Power, 2019 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/eb1fc1d4e926949a8527dd6d54313f8e/RE.PDF>
- [20] 24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor AD7745/AD7746. *Mouser* [online]. Analog Devices, 2005 [cit. 2020-09-20]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/609/AD7745_7746-1502061.pdf
- [21] Ultralow Power, 2-Channel, Capacitance Converter for Proximity Sensing AD7150. *Analog Devices* [online]. -: Analog Devices, 2019 [cit. 2020-09-20]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7150.pdf>
- [22] ATmega324PB Datasheet Complete. *Microchip Technology* [online]. Microchip Technology, 2017 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001908A.pdf>
- [23] DC/DC Converter TBA 1 Series, 1 Watt. *TME* [online]. Traco Power, 2019 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/04c8092078f15ad8e8fca758a461a5e9/tba1-datasheet.pdf>
- [24] Hot Swappable Dual I2C Isolators ADuM1250/ADuM1251. *TME* [online]. Analog Devices, 2006 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/c66f5eec2cec58f039c803c3387ad6c3/ADUM1250ARZ.pdf>
- [25] LAQUA, Markus. Narrow Band (NB) IoT – How to reach the next level in the IoT game? *BearingPoint* [online]. BearingPoint, 2021 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.bearingpoint.com/en/our-success/insights/narrow-band-iot/>
- [26] PECH, Jiří. IOT TECHNOLOGIE: DO BUDOUCNOSTI S OPERÁTORŮ (5/5). *EMan* [online]. eMan, 2019 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.eman.cz/blog/iot-technologie-budoucnost-5-5/>
- [27] Jak se vyznat v bezdrátových sítích pro IoT. *IoTPORT* [online]. České Radiokomunikace, 2019 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/jak-se-vyznat-v-bezdratovych-sitich-pro-iot>
- [28] PECH, Jiří. IOT TECHNOLOGIE: LORA A LORAWAN (3/5). *EMan* [online]. -: eMan, 2019 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.eman.cz/blog/iot-technologie-lora-a-lorawan-3-5/>
- [29] LoRa World Record Broken: 832km/517mi using 25mW. *The Things Network* [online]. The Things Network, 2020 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.thethingsnetwork.org/article/lorawan-world-record-broken-twice-in-single-experiment-1>
- [30] RN2483 Low-Power Long Range LoRa® Technology Transceiver Module. *Microchip Technology* [online]. Microchip Technology, 2015 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z:

- <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS50002346D.pdf>
- [31] High Performance Relative Humidity and Temperature Sensor HS300x Datasheet. *Renesas Electronics Corporation* [online]. Renesas Electronics Corporation, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/document/dst/hs300x-datasheet>
 - [32] LPS331AP MEMS pressure sensor: 260-1260 mbar absolute digital output barometer. *STMicroelectronics* [online]. STMicroelectronics, 2012 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/lps331.pdf>
 - [33] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. *Maxim Integrated* [online]. Maxim Integrated, 2019 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
 - [34] Pololu 5V Step-Up Voltage Regulator U1V10F. *Pololu Corporation* [online]. Pololu Corporation, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2564>
 - [35] ISM or ISM & BT or GPS Stamp Metal Embedded SMT Antenna. *Farnell* [online]. Ethertronics, 2019 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/3182261.pdf>
 - [36] Standard Antenna Solutions. *Farnell* [online]. TE Connectivity, 2014 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1963775.pdf>
 - [37] 868MHz Embedded Ceramic Loop Antenna for ISM/Lora/LPWAN/Sigfox. *Farnell* [online]. Taoglas, 2016 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2647030.pdf>
 - [38] 868 MHz Antenna for small form factor applications. *Farnell* [online]. Johanson Technology, 2016 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2280483.pdf>
 - [39] KERVEL, Fredrik. Design Note DN023: 868 MHz, 915 MHz and 955 MHz Inverted F Antenna. *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments, 2011 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra228c/swra228c.pdf?ts=1598450468242>
 - [40] WALLACE, Richard. Design Note DN024: Monopole PCB Antenna with Single or Dual Band Option. *Texas Instruments* [online]. -: Texas Instruments, 2013 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/swra227e/swra227e.pdf?ts=1618267907391>
 - [41] CR 123 A Lithium Manganese Dioxide. *VARTA* [online]. VARTA Microbattery, 2014 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: https://products.varta-microbattery.com/applications/mb_data/documents/data_sheets/DS6205.pdf
 - [42] InfluxDB v2.0 release notes. *InfluxData Documentation* [online]. InfluxData, 2019 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://docs.influxdata.com/influxdb/v2.0/reference/release-notes/influxdb/>
 - [43] Denní data dle zákona 123/1998 Sb. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2021 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb#>
 - [44] Expertní posouzení dopadu sucha. *Intersucho* [online]. Ústav výzkumu globální změny AV ČR, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.intersucho.cz/cz/dotaznik/>
 - [45] *AgroRisk* [online]. Ústav výzkumu globální změny Akademie Věd České republiky (CzechGlobe), MENDELU, VÚRV ČHMÚ, 2021 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.agrisk.cz/>
 - [46] LEG-F SERIES. *TME* [online]. RAYEX ELECTRONICS, 2021 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/facc22af0219a1d2944a33df4662b473/LEG-F-SERIES.pdf>

- [47] FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA INTEGRAČNÍHO A DERIVAČNÍHO ČLENU RC. *Lékařská fakulta Masarykovy univerzity* [online]. Masarykova univerzita, 2021 [cit. 2021-4-21]. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/files/optometrieBC/XI.pdf>
- [48] Odběr porušeného půdního vzorku. *Multimediální učebnice hydropedologických terénních měření* [online]. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2011 [cit. 2021-4-20]. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz/poruseny.html>

Seznam příloh

Příloha č. 1	Schémata navržených zařízení	I
Příloha č. 2	Motivy desek plošných spojů navržených zařízení	VII
Příloha č. 3	Tabulka dostupných příkazů pro senzor verze 2.2	XIII
Příloha č. 4	Firmware, schémata a DPS.....	elektronicky

Příloha č. 1 Schémata navržených zařízení

Jednotlivá schémata navržených zařízení byla vložena na samostatné strany tak, aby byla rozměrově co možná největší, a tudíž lépe čitelná.

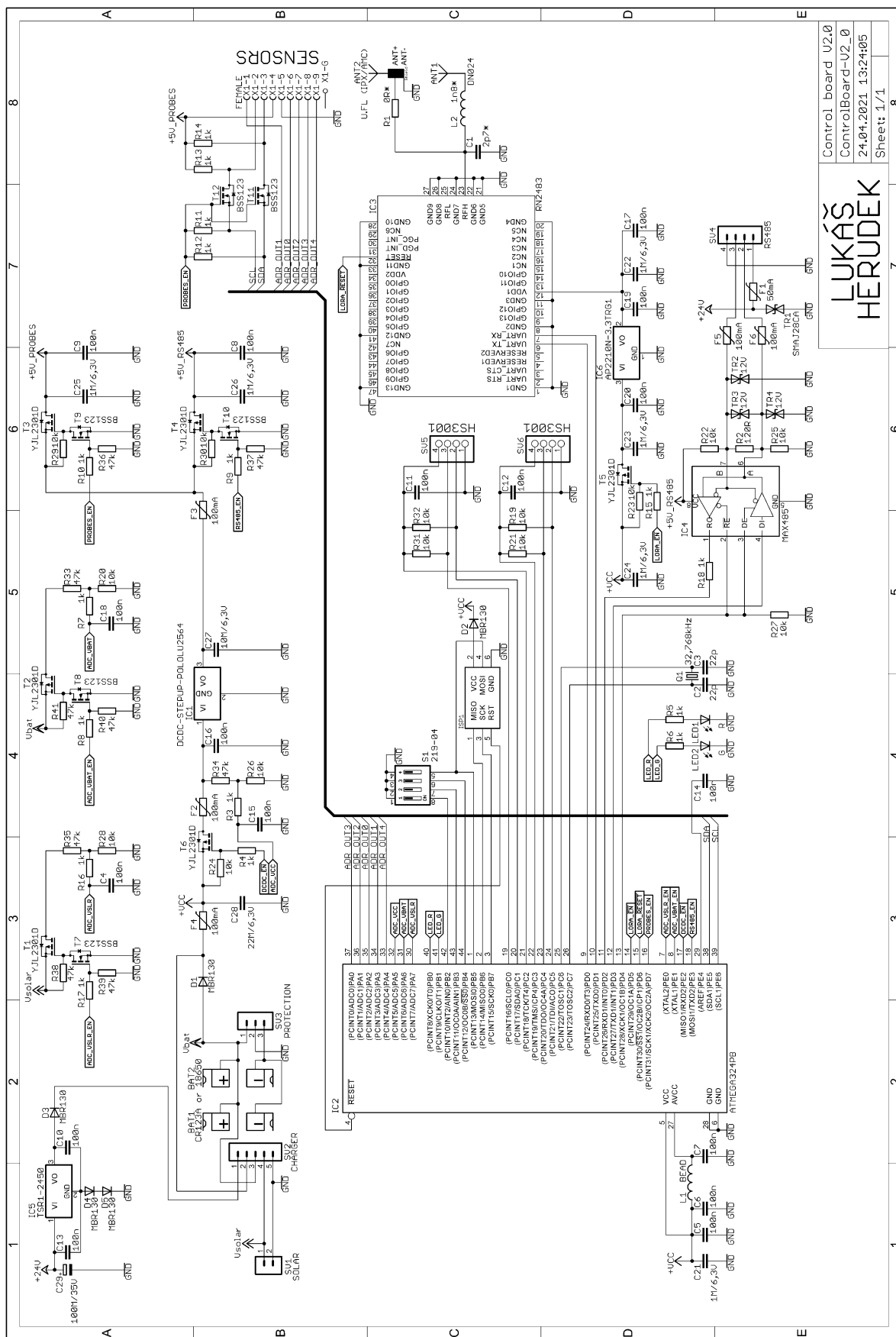


Schéma řídicí jednotky sondy půdní vlhkost ve verzi 2.0

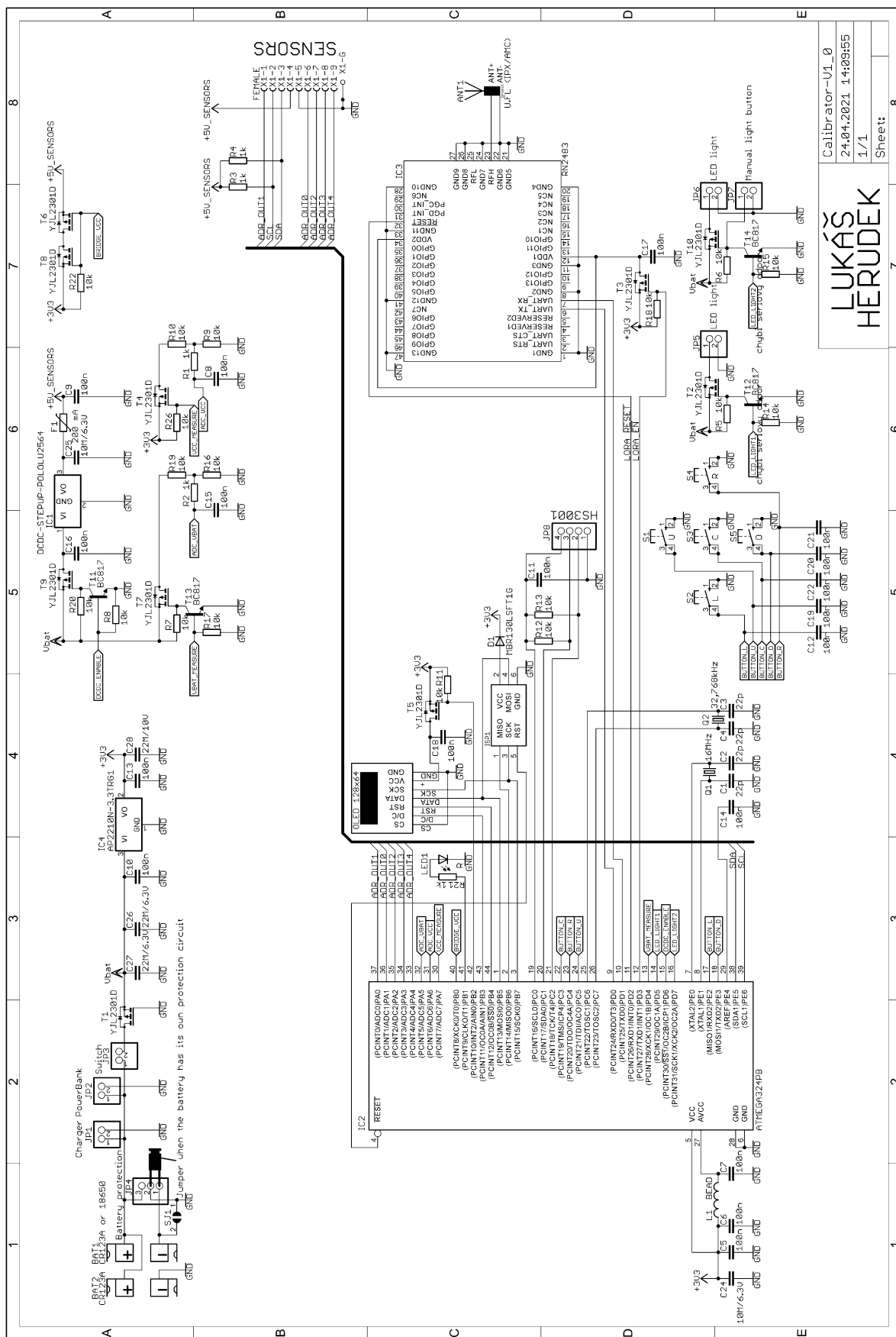


Schéma vývojového a kalibračního zařízení ve verzi 1.0

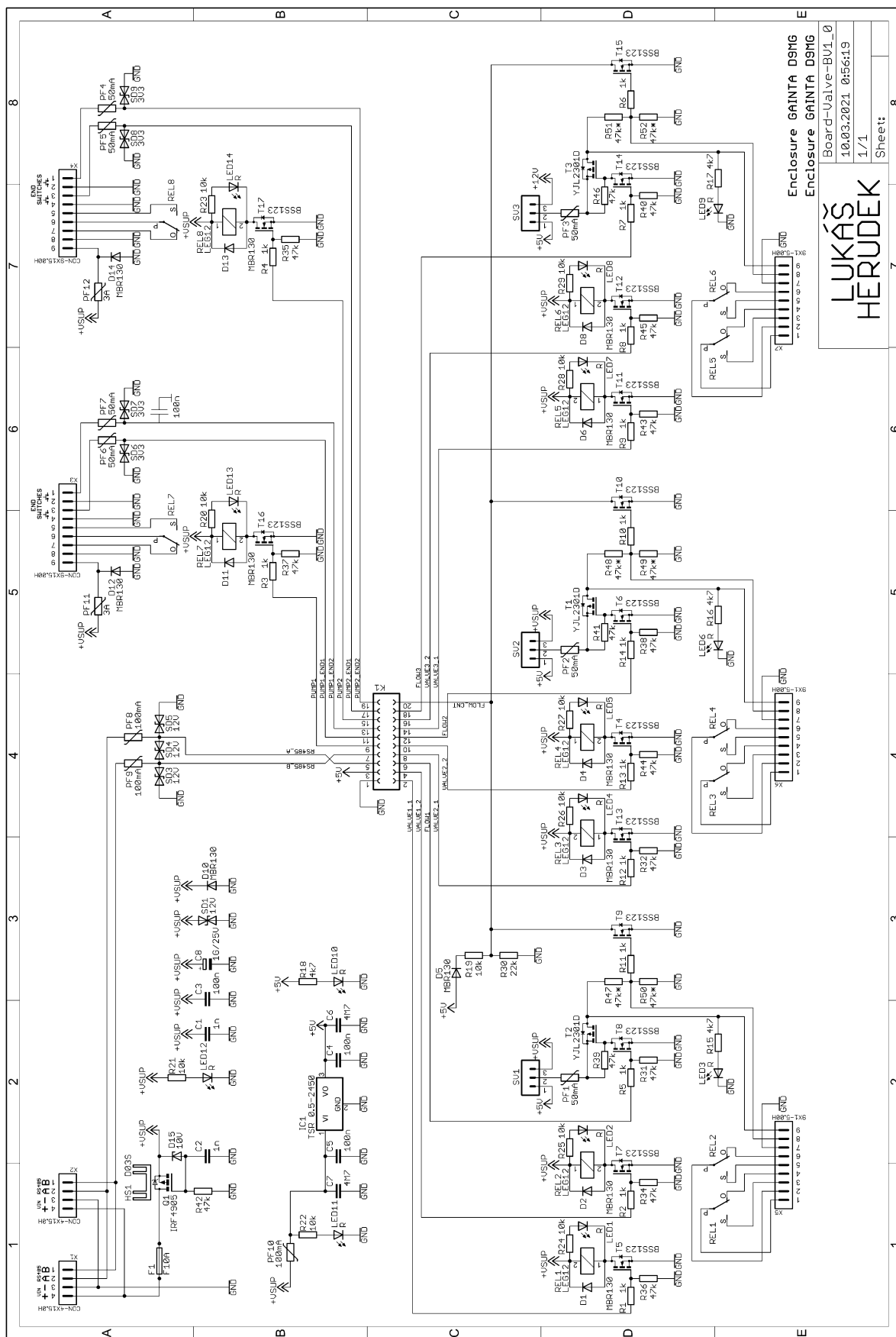
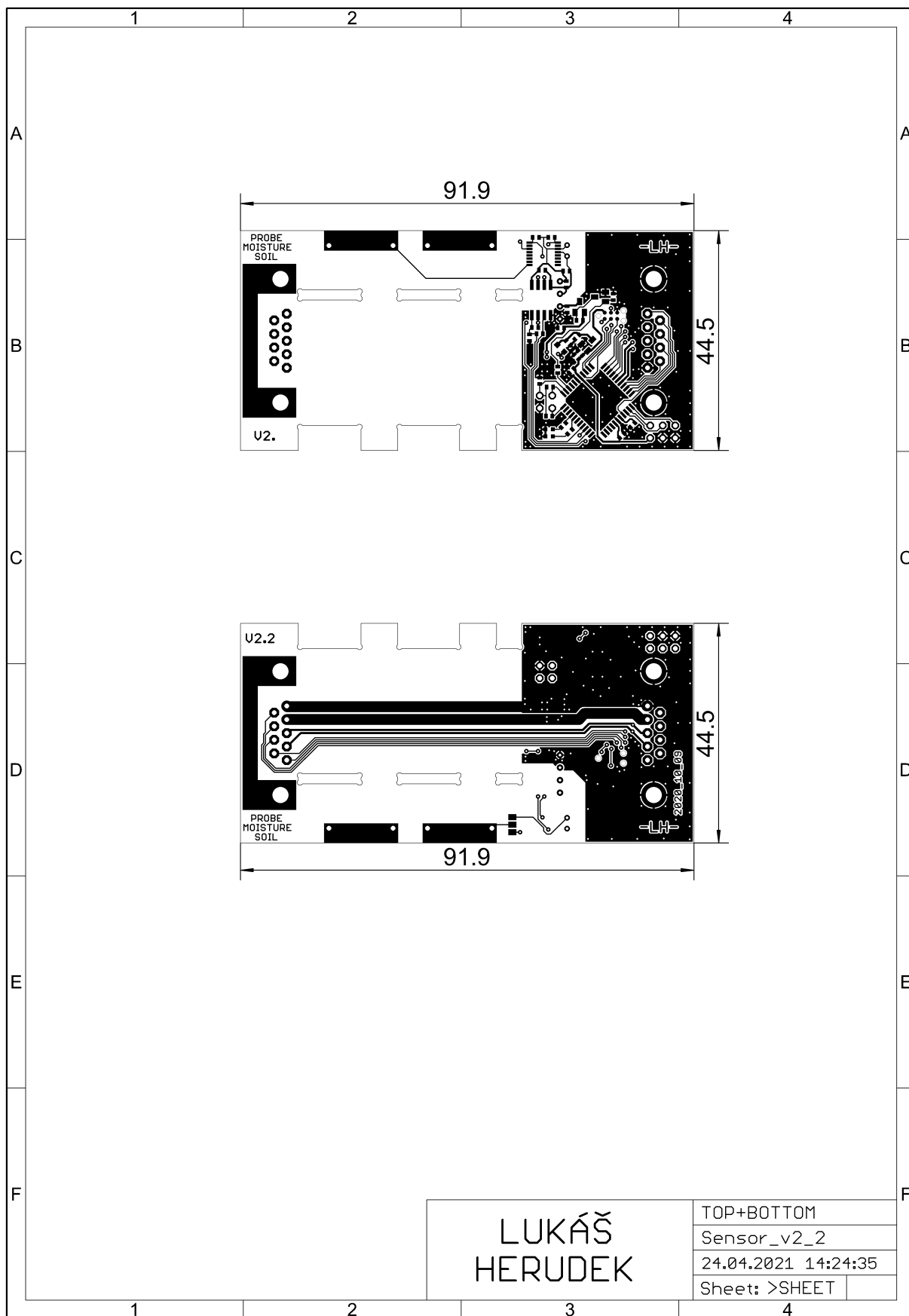


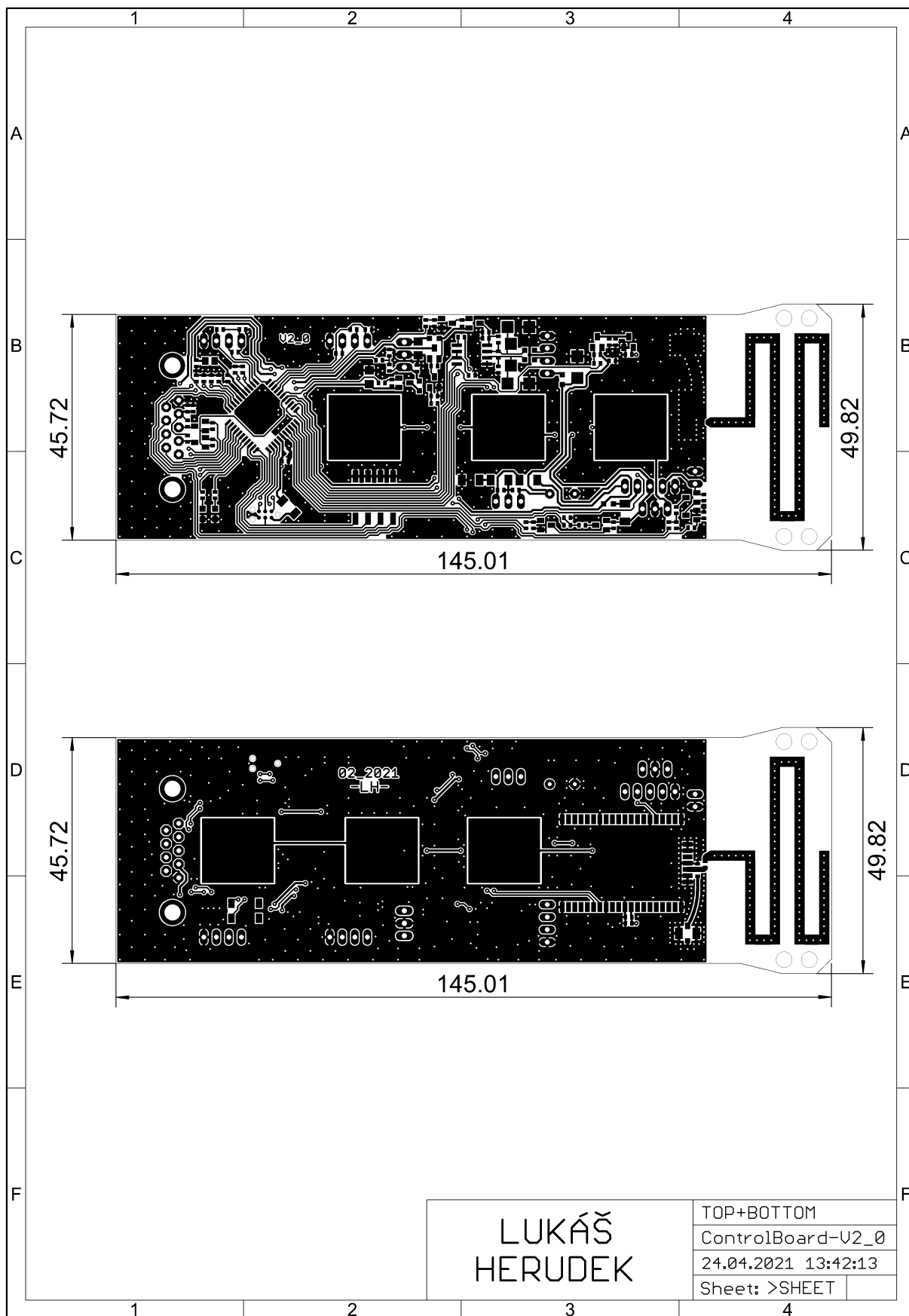
Schéma řídicí jednotky závlahového systému, spodní deska ve verzi 1.0

Příloha č. 2 Motivy desek plošných spojů navržených zařízení

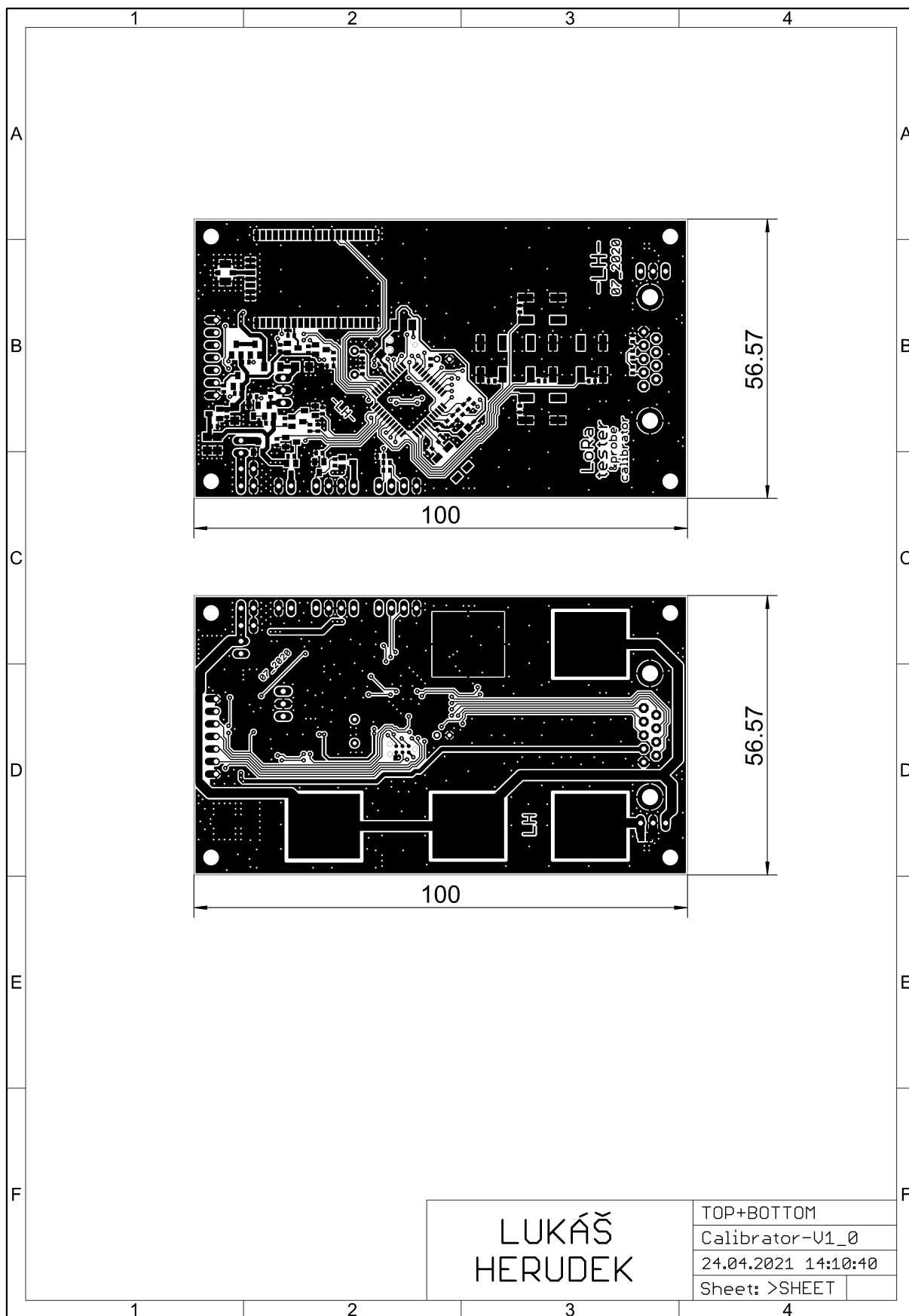
Jednotlivé motivy desek plošných spojů navržených zařízení byly vloženy na samostatné strany tak, aby byly rozměrově co možná největší, a tudíž lépe čitelné.



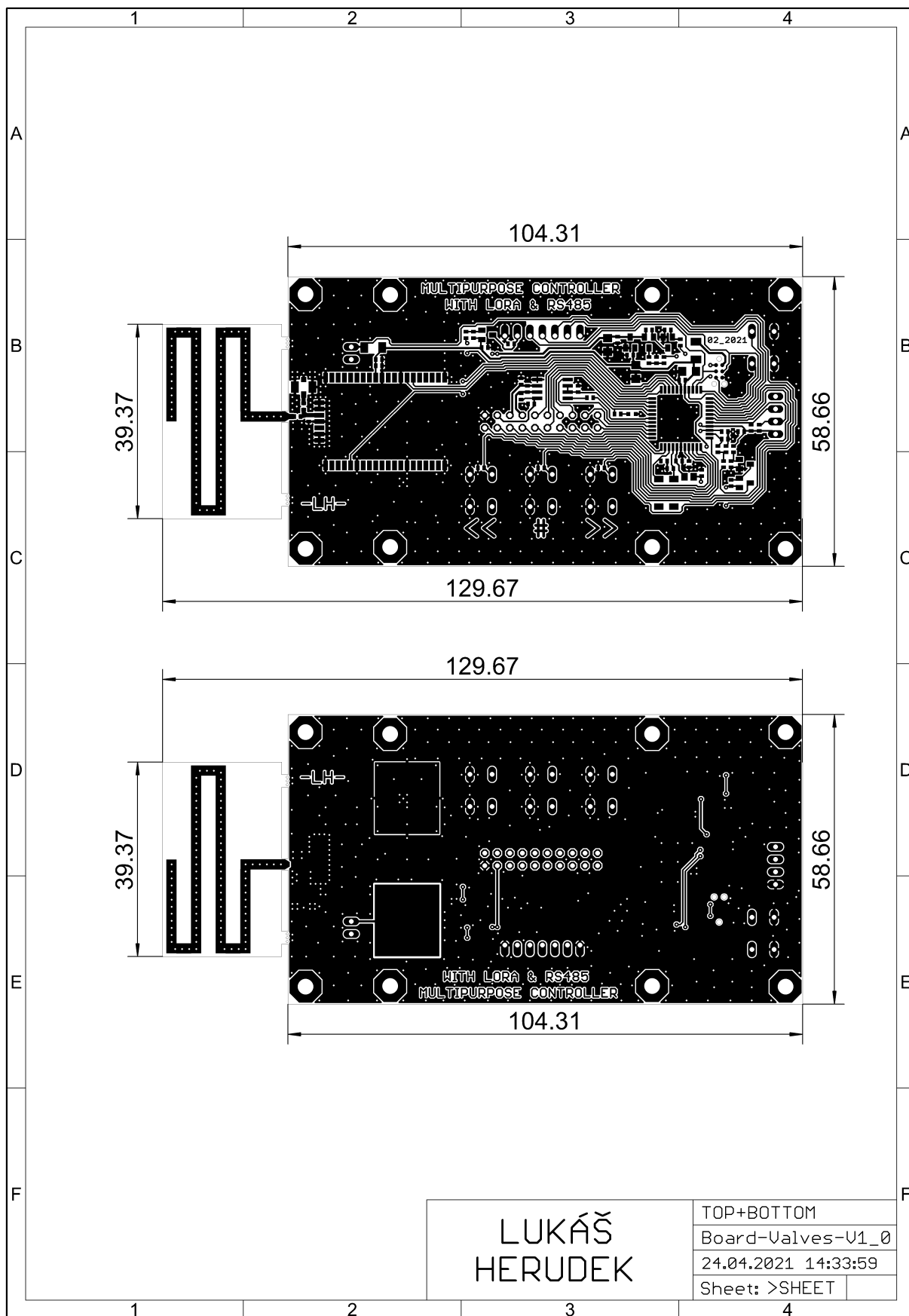
Motiv plošného spoje senzoru půdní vlhkosti ve verzi 2.2



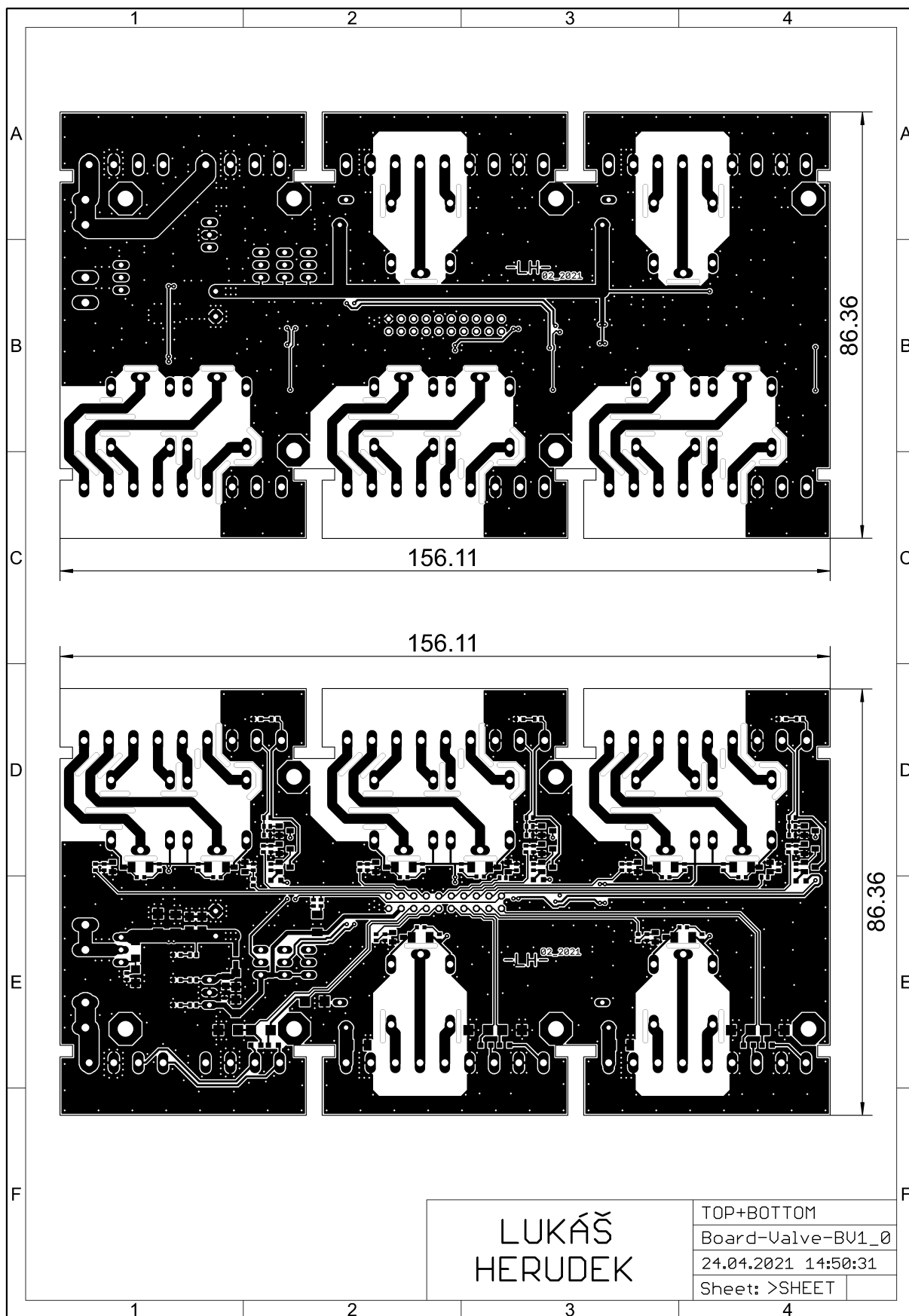
Motiv plošného spoje řídicí jednotky sondy půdní vlhkosti ve verzi 2.2



Motiv plošného spoje vývojového a kalibračního zařízení ve verzi 1.0



Motiv plošného spoje řídicí jednotky závlahového systému, horní deska ve verzi 1.0



Motiv plošného spoje řídicí jednotky závlahového systému, spodní deska ve verzi 1.0

Příloha č. 3

Tabulka dostupných příkazů pro senzor verze 2.2

Název příkazu	Příkaz HEX	Počet datových bajtů		Popis příkazu
		M→S	S→M	
ERR_RESET	F5	-	-	Zašle senzoru pokyn k resetu
ERR_PING	F0	-	-	Zjistí, zda je slave přítomen na sběrnici
LED_R_SET	E0	-	-	Zapne červenou LED senzoru
LED_R_CLR	E1	-	-	Vypne červenou LED senzoru
LED_R_TGL	E2	-	-	Invertuje červenou LED senzoru
LED_R_BLINK	E3	1	-	Bliká červenou LED senzoru (v desítkách ms) [čas v 10x ms] - 0-255 = 0-2550 ms = 100 Hz ~ 0,392 Hz (0 = vypnuto)
LED_G_SET	E4	-	-	Zapne zelenou LED senzoru
LED_G_CLR	E5	-	-	Vypne zelenou LED senzoru
LED_G_TGL	E6	-	-	Invertuje zelenou LED senzoru
LED_G_BLINK	E7	1	-	Bliká zelenou LED senzoru (v desítkách ms) [čas v 10x ms] - 0-255 = 0-2550 ms = 100 Hz ~ 0,392 Hz (0 = vypnuto)
MEAS_TEMP	A9	-	-	Vyšle požadavek na změření teploty
GET_TEMP	A8	-	2	Odpovídá na požadavek na teplotu [MSB] [LSB] - interval možných teplot = -327,68 ~ +327,67 °C
MEAS_SOIL_HUMI	A7	-	-	Vyšle požadavek na změření půdní vlhkosti
GET_SOIL_HUMI	A6	-	2	Odpovídá na požadavek na půdní vlhkost [MSB][LSB] - interval možné půdní vlhkosti = (0,655,35) %HUMI (např.: 44,99 %)
MEAS_SOIL_HUMI_RAW	A5	-	-	Vyšle požadavek na změření půdní vlhkost bez úpravy po kalibraci (surová hodnota měřícího obvodu)
GET_SOIL_HUMI_RAW	A4	-	2	Odpovídá na požadavek na půdní vlhkost ve formátu [MSB][LSB] - interval hodnot = (0,65535)
MEAS_VOLT	A3	-	-	Vyšle požadavek na změření napájecího napětí senzorické části (dojde k zapnutí senzorické části = vysoká spotřeba!)
GET_VOLT	A2	-	2	Odpovídá na požadavek na napájecí napětí [MSB][LSB] - interval možného napětí = 0 ~ 65,535 V
MEAS_ALL	A1	-	-	Vyšle požadavek na změření všech dostupných veličin (dojde k zapnutí senzorické části = vysoká spotřeba!)
GET_ALL	A0	-	8	Vrací všechny naměřené veličiny [MSB %SM][LSB %SM], [MSB °C][LSB °C], [MSB Volt][LSB Volt], [MSB SMraw][LSB SMraw]
TWI_ADDRESS_GEN_START	9F	-	-	Vyvolá u senzoru sekvenci pro zjištění adresy (pomocí stavu na fyzických pinech) - broadcast adresa!
TWI_ADDRESS_GEN_STOP	9E	-	-	Ukončí u senzoru sekvenci pro zjištění adresy (pomocí stavu na fyzických pinech), uloží adresu do EEPROM - broadcast adresa!
TWI_ADDRESS_GEN_READ	9D	-	-	Přijímače načtou adresu na fyzických pinech - broadcast adresa!
TWI_ADDRESS_GEN_WRITE	9C	-	-	Přijímače zapíše adresu na fyzické piny - broadcast adresa!
TWI_ADDRESS_SET	9B	1	-	Nastaví adresu senzoru pomocí broadcast na specifickou adresu (na sběrnici může být pouze jeden senzor)
WAKE_UP	98	-	-	Probuzení senzoru z režimu spánku
GO_TO_SLEEP	97	-	-	Pokyn senzoru k přechodu do režimu spánku
SET_CALIB_WATER	59	-	-	Nastaví aktuální měřenou hodnotu půdní vlhkosti jako maximum (pro kalibraci)
SET_CALIB_AIR	58	-	-	Nastaví aktuální měřenou hodnotu půdní vlhkosti jako minimum (pro kalibraci)
GET_CALIB_WATER	56	-	4	Vrátí hodnotu nastaveného maxima pro kalibraci včetně teploty [MSB SMraw][LSB SMraw], [MSB °C][LSB °C]
GET_CALIB_AIR	55	-	4	Vrátí hodnotu nastaveného minima pro kalibraci včetně teploty [MSB SMraw][LSB SMraw], [MSB °C][LSB °C]
SET_CAPDAC_VALUE	54	1	-	Nastaví hodnotu interní kompenzace CAPDAC [0-127]
GET_CAPDAC_VALUE	53	-	1	Vrátí hodnotu interní kompenzace CAPDAC [0-127]

Tabulka dostupných příkazů pro senzor verze 2.2